

TESIS



**PROCEDIMIENTO
PARA LA MODELACIÓN DE
COORDENADAS ESPACIALES
EN LA REGIÓN MINERA DE MOA**

Yordanys Esteban Batista Legrá

Página legal

Título de la obra: Procedimiento para la modelación de coordenadas espaciales en la región minera de Moa, 166pp.

Editorial Digital Universitaria de Moa, año.2016 -- ISBN:

1. Autor: Yordanys Esteban Batista Legrá

2. Institución: Instituto Superior Minero Metalúrgico " Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Edición: Lic. Liliana Rojas Hidalgo

Corrección: Lic. Liliana Rojas Hidalgo

Digitalización. Lic. Liliana Rojas Hidalgo



Institución de los autores: ISMM " Dr. Antonio Núñez Jiménez"

Editorial Digital Universitaria de Moa, año 2016

La Editorial Digital Universitaria de Moa publica bajo licencia Creative Commons de tipo Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada, se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de las obras y no realice ninguna modificación de ellas.

La licencia completa puede consultarse en:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Editorial Digital Universitaria

Instituto Superior Minero Metalúrgico

Ave Calixto García Íñiguez # 75, Rpto Caribe Moa 83329, Holguín Cuba

e-mail: edum@ismm.edu.cu

Sitio Web: <http://edum.ismm.edu.cu>

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
" ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE GEOLOGÍA - MINERÍA
DEPARTAMENTO DE MINERÍA**

**PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE COORDENADAS
ESPACIALES EN LA REGIÓN MINERA DE MOA**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

YORDANYS ESTEBAN BATISTA LEGRÁ

MOA-2015

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA
" ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ"
FACULTAD DE GEOLOGÍA - MINERÍA
DEPARTAMENTO DE MINERÍA**

**PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE COORDENADAS
ESPACIALES EN LA REGIÓN MINERA DE MOA**

Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas

Autor: Ing. Yordany Esteban Batista Legrá, M. Sc

Tutor: Prof. Tit., Ing. Orlando Belete Fuentes, Dr. C

Listado de siglas

GPS.	Sistema de posicionamiento global
NAG.	Nivelación astrogravimétrica
N GPS	Nivelación GPS
RC 3011	Norma Cubana
CEPRONIQUEL.	Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel
GDOP.	Geometría de dilución de precisión
GUM.	Guía de estimación de incertidumbres
MCM.	Simulación Monte Carlo
NMM.	Nivel medio del mar
SIG.	Sistema de información geográfica
TIN.	Superficie triangular e irregular para modelos digitales
UTM	Proyección cartográfica: Universal Transversa de Mercator
RGE	Red geodésica estatal
ME	Mira de espalda
MF	Mira de frente
MG	Modelos geopotenciales
ONHG	Oficina Nacional de Hidrografía y Geodesia.
MINFAR	Ministerio de las Fuerzas Armadas Revolucionarias
MDT	Modelo digital del terreno
MDAE	Modelo digital de alturas elipsoidales
MDCG	Modelo digital de correcciones gravimétricas
MOG	Modelo de ondulaciones del geoide
ARGIS	Software de sistema de información geográfica

SÍNTESIS

El presente trabajo tiene como objetivo modelar coordenadas espaciales para la obtención de parámetros técnicos de medición en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa, con la finalidad de lograr una mayor eficiencia con la nueva tecnología de estaciones totales y sistema de posicionamiento global (GPS) en los procesos productivos.

Se elabora un procedimiento como resultado de un análisis interdisciplinario, donde se aplican métodos relacionados con la Geodesia Física, Topografía, Hidrografía, Cartografía Digital, Modelación y Simulación. Se integran diferentes softwares para el procesamiento de los resultados obtenidos en los experimentos.

Como resultados se muestran nuevos parámetros técnicos para la poligonometría y levantamientos topográficos, la aplicación de la simulación Monte Carlo en el cálculo de la incertidumbre de medición, una nueva concepción para determinar un modelo de ondulaciones del geoide y la implementación de un SIG para la modelación.

TABLA DE CONTENIDO

Materia	Pág
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES Y TENDENCIAS ACTUALES DEL EMPLEO DE INSTRUMENTOS TOPOGEODÉSICOS EN LA MINERÍA	
1.1. Introducción	10
1.2. Antecedentes y tendencias actuales de los instrumentos topográficos	11
1.3. Concepto de estaciones totales	13
1.4. Principios de funcionamiento de la tecnología GPS	14
1.5. El geoide como superficie de referencia	15
1.5.1. Métodos para determinar modelos de ondulaciones del geoide	17
1.6. La tecnología de estaciones totales y GPS en la minería y su impacto en Cuba	18
1.7. Principales características de los softwares utilizados para la modelación de coordenadas espaciales	19

1.8. Análisis de los trabajos precedentes relacionados con la temática a nivel internacional	21
1.9. Análisis de los trabajos precedentes relacionados con la temática en Cuba	27
1.10. Conclusiones parciales	31

CAPITULO 2. PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE COORDENADAS ESPACIALES EN LA REGIÓN MINERA DE MOA

2.1. Contenido	33
2.2. Propósito	34
2.3. Alcance	35
2.4. Responsabilidad y autoridad	35
2.5. Descripción de las actividades de la primera etapa del procedimiento	36
2.5.1. Trabajos de campo	36
2.5.2. Trabajos de gabinete	39
2.6. Descripción de las actividades de la segunda etapa del procedimiento	42
2.6.1. Trabajos de campo	42
2.6.1.1. Determinación de incertidumbre de medición por el método de simulación Monte Carlo	53
2.6.2. Trabajos de gabinete	59

2.7. Conclusiones parciales	62
-----------------------------	----

CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE COORDENADAS ESPACIALES

3.1. Características físico-geográficas del área de estudio (caso de estudio)	63
3.2. Trabajos de campo con las estaciones totales	65
3.3. Trabajos de gabinete para la determinación de parámetros técnicos aplicados a las estaciones totales	67
3.3.1. Análisis de las tolerancias admisibles para la densificación de redes	67
3.3.2. Determinación de las tolerancias admisibles por normas en coordenadas espaciales para poligonales.	69
3.3.3. Determinación de las tolerancias admisibles por normas en coordenadas espaciales para levantamientos topográficos.	72
3.4. Análisis de los resultados de las mediciones experimentales con estaciones totales	72
3.4.1. Análisis comparativo de los errores obtenidos en las mediciones experimentales y los establecidos por las normas	74
3.4.2. Parámetros técnicos modelados para coordenadas espaciales	75

3.5. Validación de los parámetros técnicos determinados para la poligonometría	75
3.5.1. Validación de los parámetros técnicos determinados para levantamientos topográficos	77
3.6. Selección del método para la determinación del modelo de ondulaciones del geoide	78
3.7. Determinación de la incertidumbre de medición del péndulo simple	80
3.8. Trabajos de campo para la determinación del modelo de ondulaciones del geoide	81
3.8.1. Medición con los receptores GPS Leica 1200	82
3.8.2. Mediciones de aceleración de la gravedad con el péndulo simple	83
3.8.3. Mediciones para la determinación de la altura del punto de origen del modelo	83
3.9. Análisis comparativo de las coordenadas altimétricas de punto Blet	85
3.10. Trabajos de gabinete para determinar el modelo de ondulaciones del geoide	86
3.11. Determinación del modelo de ondulaciones del geoide a partir del análisis geoespacial de planos aplicando herramientas de SIG	87

3.12. Cálculo de la corrección por el efecto de las perturbaciones de gravedad	87
3.13. Cálculo de los modelos de ondulaciones del geoide	89
3.14. Validación de los modelos	90
3.15. Análisis comparativo de los modelos	92
3.16. Evaluación de la efectividad económica del procedimiento propuesto	94
3.17. Conclusiones parciales.	96
CONCLUSIONES GENERALES	97
RECOMENDACIONES	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

Durante varios años en los procesos de exploración geológica y explotación minera en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa se confrontan problemas con las coordenadas de los puntos de apoyo utilizados para la realización de los trabajos topográficos, los cuales han provocado inestabilidad y atrasos en los procesos productivos, influyendo en la exactitud de los resultados del cálculo de reservas, así como el volumen de mineral extraído (Belete y Batista, 2012).

Con el desarrollo científico-técnico, el avance de la tecnología de instrumentos topográficos y la necesidad de estudiar los distintos fenómenos naturales que inciden sobre las obras mineras, se necesitan bases de apoyo con criterios de exactitud más rigurosos, que permitan dar respuesta a las necesidades topográficas siempre crecientes en los yacimientos de la región minera de Moa.

En las minas de las empresas Pedro Sotto Alba y René Ramos Latour las redes geodésicas existentes fueron construidas antes del año 1959 y en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara desde el año 1986, según Wagdi (2010). Por las condiciones físico-geográficas y la extensión de los yacimientos las coordenadas de estos puntos fueron obtenidas por los métodos de densificación poligonometría y nivelación, que por el paso de los años y la tecnología empleada para su determinación no satisfacen las exigencias en cuanto a exactitud y precisión de las nuevas tecnologías de instrumentos topogeodésicos.

En los trabajos topográficos en yacimientos lateríticos que corresponden a las empresas de níquel Comandante Ernesto Che Guevara y Comandante Pedro Sotto Alba, se aprecian las tendencias siguientes:

1. Se incorporan nuevas tecnologías de instrumentos topogeodésicos.
2. Se ha logrado incrementar la productividad en los trabajos topográficos.
3. El procesamiento de los datos topográficos tomados en campo se ha logrado automatizar.

En la literatura e instrucciones vigentes se recogen los principales parámetros para la densificación de redes geodésicas a poligonales y nivelación con diferentes órdenes de precisión, sin embargo, estos documentos no tienen en cuenta la precisión de las nuevas tecnologías de instrumentos topogeodésicos y son pobres las informaciones relacionadas con la determinación de coordenadas espaciales.

Se analizaron un total de 123 fuentes bibliográficas, que posibilitaron el análisis y la síntesis de los elementos fundamentales para la investigación. Durante la revisión se identificaron las tendencias actuales siguientes:

1. Los documentos técnicos rectores para la realización de poligonales datan del año 1987, los cuales se realizaron de acuerdo a las características técnicas del equipamiento topográfico de la época.
2. La estación total y los GPS integran las coordenadas planimétricas y altimétricas en un proceso de medición, sin embargo, los parámetros vigentes están relacionados a dos métodos de densificación independientes: las poligonales y la nivelación, lo cual duplica los trabajos de campo.

3. Se realizan las mediciones topográficas con los GPS, donde se han obtenido avances significativos en la determinación de la posición planimétrica de puntos sobre la superficie terrestre, no siendo así en la determinación altimétrica, influenciado por las irregularidades que presenta la figura física de referencia denominada geoide en el territorio nacional.
4. No se cuenta con una metodología, instrucción o procedimiento que rija el trabajo de la topografía minera fundamentado en las potencialidades de nuevas tecnologías de instrumentos topogeodésicos.

Al considerar la exactitud esperada en los trabajos de la topografía minera y los que se ejecutan con ambas tecnologías, se definen dos líneas de trabajo fundamentales:

- En las estaciones totales: cómo fusionar los métodos de densificación poligonometría y nivelación en un método que permita obtener las coordenadas espaciales de acuerdo a las tolerancias admisibles que exigen los trabajos en la minería, así como determinar nuevos parámetros de medición para explotar al máximo las potencialidades del instrumento.
- En los GPS: garantizar la exactitud adecuada en la determinación de la posición altimétrica de puntos para obtener coordenadas espaciales y así ampliar su empleo en los trabajos topográficos mineros.

El presente trabajo representa una investigación que se caracteriza por su interés en la aplicación y consecuencias prácticas de los conocimientos. Satisface necesidades concretas relacionadas con la actividad de la topografía minera, su propósito es mejorar un producto o proceso de producción y sentar las bases para complementar tareas de máxima prioridad del estado:

1. Contribuir al futuro proyecto de minería de precisión.

2. Explotación de las nuevas tecnologías en los yacimientos de la región minera de Moa, de acuerdo a la productividad para lo cual están diseñadas.

Problema:

No existe un procedimiento que permita modelar coordenadas espaciales y definir parámetros técnicos de medición en los yacimientos de la región minera de Moa, para la eficiente explotación de estaciones totales y sistema de posicionamiento global.

Objeto de estudio:

La modelación de coordenadas espaciales en la región minera de Moa.

Campo de acción:

Los yacimientos lateríticos de las empresas de níquel Comandante Ernesto Che Guevara y Comandante Pedro Sotto Alba.

Objetivo de la investigación:

Elaborar un procedimiento que permita modelar coordenadas espaciales y definir parámetros técnicos de medición para la utilización eficiente de estaciones totales y sistema de posicionamiento global en la región minera de Moa.

Hipótesis:

Si se evalúa la exactitud de las estaciones totales en condiciones ambientales y se determina un modelo de ondulaciones del geoide para la región minera de Moa, entonces es posible elaborar un procedimiento para modelar coordenadas espaciales y definir parámetros de medición en los yacimientos de la región minera de Moa.

Objetivos específicos:

1. Evaluar la exactitud de las mediciones con estaciones totales en las condiciones ambientales de los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa.
2. Definir los parámetros técnicos de medición en la poligonometría y levantamientos topográficos con el empleo de las estaciones totales.
3. Determinar un modelo de ondulaciones del geoide origen para la región minera de Moa.
4. Modelar las coordenadas espaciales a partir del análisis geoespacial de planos en plataformas SIG.

Novedad científica:

Un procedimiento que permite modelar coordenadas espaciales y definir parámetros técnicos de medición para el empleo de las nuevas tecnologías de estaciones totales y GPS, de acuerdo con la productividad para lo cual están diseñadas.

Aportes teóricos:

- Nuevos parámetros técnicos poligonométricos y de levantamientos para el empleo de estaciones totales.
- Se plantea una nueva concepción para determinar un modelo de ondulaciones del geoide como resultado de la fusión del método geométrico y el físico.

Aportes prácticos:

- Determinación de un modelo de ondulaciones del geoide origen para la región minera de Moa.

- Establecimiento de un punto de origen referido al nivel medio del mar para la modelación de las ondulaciones del geoide en los yacimientos de la región minera de Moa.
- Un sistema de información geográfica para el análisis integral de los resultados.

Actualidad, necesidad e importancia de la investigación:

El empleo de las estaciones totales y los GPS en la actividad minera en Cuba constituye una temática actual, que se desarrolla cada día más, siendo una preocupación constante de especialistas determinar las coordenadas espaciales con las nuevas tecnologías, a partir de parámetros técnicos científicamente fundamentados y ajustados a la exactitud que requieren los trabajos en la minería. Con ello se logrará una mayor productividad, eficiencia, calidad y perfeccionamiento de los servicios topográficos en la región minera de Moa.

Métodos empleados para dar solución al problema científico de la investigación:

- Métodos empíricos: fue imprescindible el empleo de la medición, la observación científica para el conocimiento de las características fundamentales del objeto, el experimento y análisis de documentos.
- Métodos teóricos para la interpretación conceptual de los datos empíricos, haciendo uso del análisis y la síntesis para el estudio de las partes del objeto y comprensión de su comportamiento como un todo; la inducción y deducción como procedimiento para pasar de lo conocido a lo desconocido y de lo general a lo particular; la modelación y el empleo de métodos matemáticos.

Producción científica del autor sobre el tema de tesis:

Los resultados de esta investigación han sido presentados en los siguientes eventos científicos:

VI Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales.

CINAREM 2011. Cuba.

XVI Fórum de Ciencia y Técnica. CEPRONIQUEL. 2011. Cuba.

VII Conferencia Internacional de Aprovechamiento de los Recursos Minerales.

CINAREM 2013. Cuba.

Fórum Provincial de Ciencia y Técnica 2015. Cuba.

VII Convención internacional de Agrimensura. 2015. Cuba.

Publicaciones sobre el tema:

- Consideraciones sobre la exactitud de redes de levantamiento topográficos. Revista Minería y Geología. Volumen 23, No. 3, septiembre 2013.
- Elaboración del modelo digital de elevaciones mediante tecnología 3D Láser escáner. Revista Minería y Geología. Volumen 30, No. 1, marzo 2014.
- Modelación del geoide en presas de cola de la región minera de Moa. Revista Minería y Geología. Volumen 30, No. 4, diciembre 2014.
- Determinación del coeficiente conjunto de curvatura y refracción en yacimientos lateríticos de Moa. Volumen 31, No. 3, septiembre 2015.

Trabajos de diploma tutorados:

- Criterios para bases de apoyo topográficas en la minería. Alumno. Chencho Wangdi. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2010.

- Determinación de la influencia de los factores meteorológicos durante las mediciones con estaciones totales para el cálculo de volumen de mineral extraído. Alumno. Lisbet Guerra Rodríguez. Instituto superior Minero Metalúrgico de Moa. 2012.
- Procedimiento para la elaboración de un Modelo Digital de Elevaciones mediante tecnología 3D Láser Escáner. Alumno. Fabián Ojeda. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 2013.

Reconocimientos obtenidos:

Premio provincial de la Academia de Ciencias de Cuba 2014. Cuba.

Premio relevante en el Fórum provincial de ciencia y técnica 2015.

Impactos producidos por la investigación:

- Actualización de las instrucciones técnicas de trabajo ITT-002 Trabajos de campo, ITT-005 Control de calidad, ITT-007 Trabajos con estación total, ITT-008 Trabajos GPS, que se aplican en todos los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa, de la empresa de Ingeniería y Proyectos de Níquel, aprobadas por la Oficina Nacional de Hidrografía y Geodesia.
- Implementación de los nuevos parámetros técnicos poligonométricos y el modelo de ondulaciones del geoide en la empresa Constructora y Reparadora del Níquel en los trabajos de movimientos de tierra en la presa de colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
- Implementación de los nuevos parámetros técnicos poligonométricos en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara en los controles de volúmenes de mineral en los frentes de arranque y canteras de préstamos.

- Implementación del procedimiento en los trabajos topográficos para el proyecto del emisor submarino de la empresa Comandante Pedro Sotro Alba.
- Implementación del procedimiento en los proyectos de exploración geológica de los yacimientos Camarioca Sur, Zona septentrional, La Delta y Canta Rana, ejecutada por la empresa Geocuba Oriente Sur, asesorado por los consultores de CIH.

Estructura del trabajo:

Capítulo 1: Antecedentes y tendencias actuales del empleo de instrumentos topogeodésicos en la minería. Se realiza un análisis crítico de los antecedentes y tendencias de la topografía minera a nivel nacional e internacional, que aborda el empleo de la nueva tecnología de instrumentos topogeodésicos y las tolerancias admisibles en los trabajos topográficos para la minería.

Capítulo 2: Procedimiento para la modelación de coordenadas espaciales en la región minera de Moa. Se propone un procedimiento para modelar coordenadas espaciales y determinar parámetros de medición para la utilización eficiente de la nueva tecnología de estaciones totales y GPS.

Capítulo 3: Validación del procedimiento para la modelación de coordenadas espaciales. Se realiza la validación en un caso de estudio, donde se muestran las investigaciones de campo y gabinete que permitieron diseñar el procedimiento, mostrando su factibilidad económica.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y TENDENCIAS ACTUALES DEL EMPLEO DE INSTRUMENTOS TOPOGEODÉSICOS EN LA MINERÍA

CAPÍTULO I. ANTECEDENTES Y TENDENCIAS ACTUALES DEL EMPLEO DE INSTRUMENTOS TOPOGEODÉSICOS EN LA MINERÍA

1.1. Introducción

Desde la antigüedad el hombre, en su actividad multifacética como ser social, siempre necesitó y necesita hoy más aún, tener el conocimiento científico filosófico del mundo material, incluida la tierra como planeta (Nuñez, 2004; Acosta, 2005).

Las aplicaciones más comprensibles por el ser social en general, relacionadas con la figura física real de la tierra y su representación, son los mapas. En los mismos se ubican e investigan la distribución espacial de la esencia y relaciones de la naturaleza, la sociedad humana y el pensamiento, así como sus variaciones en el tiempo, mediante el empleo de diferentes modelos (Acosta, 2005).

La exactitud de los trabajos topográficos que hoy en día se ejecutan en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa dependen, en gran medida, de las bases de apoyo de levantamiento. Con el advenimiento del sistema de posicionamiento global por satélites y las estaciones totales se ha hecho cada vez más real el sueño sobre la determinación de coordenadas espaciales a grandes distancias con exactitudes similares a las de la nivelación geométrica con el mínimo gasto material y humano.

1.2. Antecedentes y tendencias actuales de los instrumentos topográficos

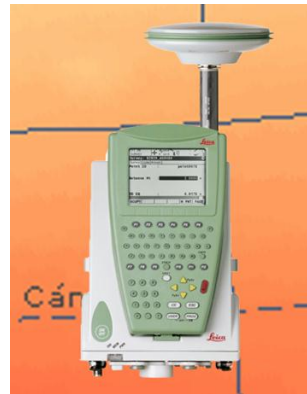
Mucho antes de dejar la vida nómada, el hombre cuando se desplazaba ya utilizaba señales en el suelo, unas naturales, otras artificiales, conocido por informes de marcha, para orientarse y tener la garantía de saber llegar a su destino (Belete, 2008). Actualmente se utiliza este sistema en letreros toponímicos con indicación de distancias a destinos, en carreteras, faros ópticos o electrónicos o aún, para los geodestas, marcos o vértices geodésicos.

Estas señales están diseminadas por todo el mundo y algunas muy antiguas constituyen aún misterios, que difícilmente se pueden solucionar.

El desarrollo tecnológico en estos días, con nuevos instrumentos, tecnologías de medición y análisis computacional, han obligado a evolucionar la concepción científica de la Geodesia y la Topografía y los resultados que de ella se esperan.

La Geodesia ha superado por mucho su base geométrica inicial y se desenvuelve en un contexto de entornos físicos dinámicos fundamentales, y ha pasado de las interpretaciones bidimensionales a las tridimensionales (Belete, 2008).

Las técnicas de medición contemporáneas se inscriben ahora en un entorno dinámico espacial que permite resultados de elevada exactitud en tiempos relativamente cortos en comparación con los métodos tradicionales, en particular las estaciones totales y los GPS (figura 1.1). En la década de los noventa vinieron a revolucionar la tecnología de medición geodésica sustituyendo ventajosamente los métodos de posicionamiento astronómico, triangulación y trilateración, aplicados hasta fechas recientes para conformar la red geodésica estatal.

**Estación Total****GPS****Figura 1.1.** Nueva tecnología de instrumentos topogeodésicos.

Ante las nuevas necesidades y conceptos modernos de las ciencias geodésicas y la topografía, se impone el desarrollo tecnológico. En la época actual, la industria niquelífera reclama con intensidad cada vez mayor instrumentos topográficos que se desempeñen satisfactoriamente en condiciones adversas, a costos accesibles y en corto tiempo.

En Cuba se trabaja en la investigación de la red geodésica estatal de apoyo para los trabajos topográficos con el empleo de las tecnologías de sistema de posicionamiento global y estaciones totales, abarcando el mayor campo posible de aplicaciones, entre ellos la minería, la construcción y la agricultura, además se ha investigado a nivel nacional la obtención de los valores permisibles para el replanteo en grandes obras industriales y altos edificios.

Desdin (2009) realizó un estudio de la red geodésica estatal para caracterizar los movimientos horizontales recientes de la corteza terrestre en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa, con la tecnología de sistema de posicionamiento global, donde se realizó un ajuste riguroso de las coordenadas

de puntos de orden superior que sirvieron de base para la investigación (figura 1.2).

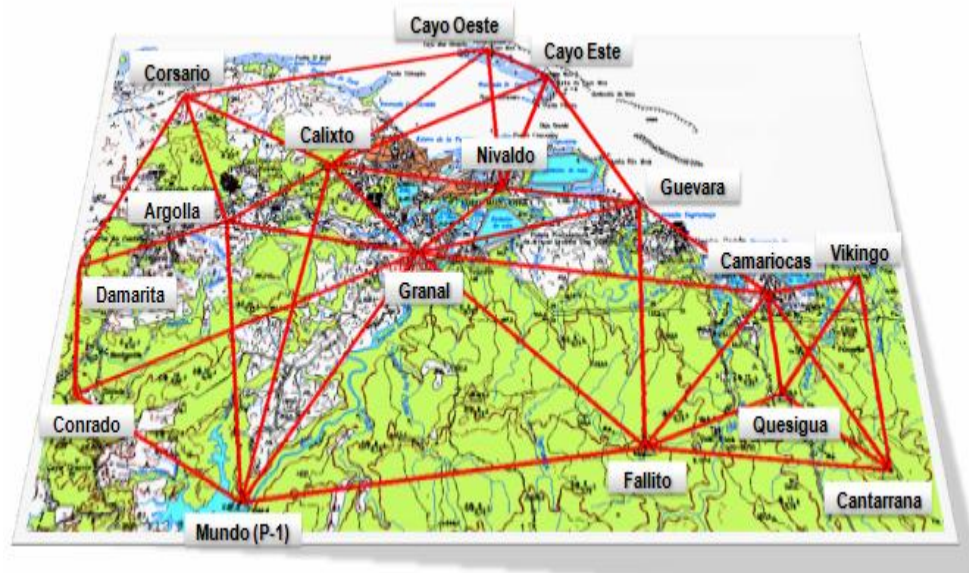


Figura 1.2. Puntos de la red geodésica estatal (tomado de Desdin, 2009).

1.3. Concepto de estaciones totales

En el marco de la medición electrónica de ángulos y distancias se denomina medición total a la acción de obtener en una observación los tres valores que caracterizan la posición de un punto en el espacio (Belete, 2008).

- El ángulo horizontal.
- El ángulo vertical.
- La distancia geométrica o inclinada.

Conjuntamente con los distanciómetros electrónicos surgieron las libretas electrónicas o terminales de datos que permiten almacenar la información y realizar determinados cálculos (Belete, 2008). En la figura 1.3 se muestra en forma esquemática la estructura de una estación total.

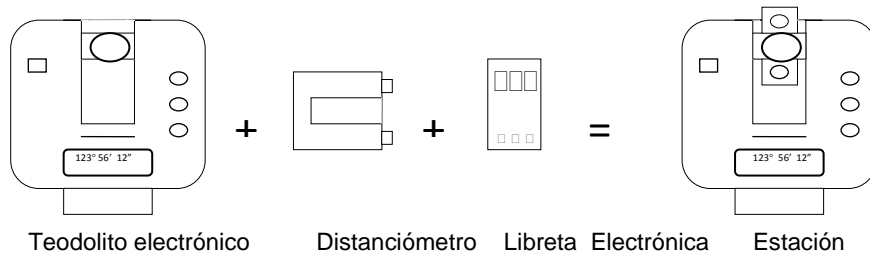


Figura 1.3. Esquema de la estructura estación total (tomado de Belete, 2008).

1.4. Principios de funcionamiento de la tecnología GPS

La tecnología GPS permite obtener coordenadas tridimensionales, por naturaleza geocéntrica en un sistema de referencia global, tanto geográficas como cartesianas, con una alta calidad en cuanto a precisión en corto tiempo, aun cuando se necesite de una fuerte etapa de procesamiento para obtener resultados altamente refinados (Hoyer *et al.*, 2002, 2004).

El sistema GPS determina la posición donde se encuentra el receptor, conociendo las distancias de tres puntos de coordenadas conocidas de satélites. Esta determinación es similar a la estación libre utilizada en la topografía clásica. Sin embargo, en el caso del GPS, los puntos de coordenadas conocidas no están sobre la superficie de la tierra, sino en el espacio (Peñafiel y Zayas, 2001).

El cálculo de la distancia se realiza recibiendo mensajes del receptor. En cada mensaje se indica el instante en que salió del satélite. El receptor tiene un reloj de precisión, que está sincronizado con el satélite y puede saber el instante que llegó el mensaje. Con estos datos, el receptor calcula la posición absoluta. Los satélites envían al receptor información sobre la posición que se encuentran los datos para que el receptor pueda calcular la distancia. Esta determinación de posición tiene errores que pueden estar en unas decenas de metros (Rodríguez *et al.*, 2007).

1.5. El geoide como superficie de referencia

La palabra geoide significa forma de la tierra, definida como la superficie equipotencial más aproximada al nivel de los océanos en estado de reposo y prolongados por debajo de los continentes. Sería la superficie de equilibrio de las masas oceánicas sometidas a la acción gravitatoria y a la fuerza centrífuga ocasionada por la rotación de la tierra, de manera que en cualquier punto la dirección de la gravedad es perpendicular a esta superficie (Acosta, 2002).

En este sentido, el geoide es una superficie definida por magnitudes físicas, donde el potencial terrestre, las anomalías gravimétricas, la distribución de masas continentales, la diferente densidad de las cortezas y el achatamiento de los polos, hace que adopte una forma compleja y ondulada (Batista, 2012). La diferencia en un punto determinado entre geoide y elipsoide se denomina ondulación del geoide, concepto fundamental en la evaluación de altitudes determinadas con GPS (figura 1.4).

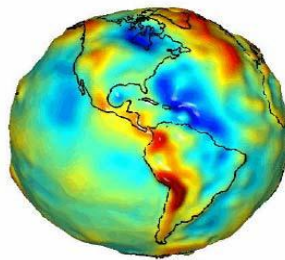


Figura 1.4. Modelo del geoide (tomado de Dalda *et al.*, 2003)

La distribución de las masas en el cuerpo de la tierra no es homogénea, por tal razón tampoco lo son las superficies de nivel, generándose ondulaciones, donde la densidad varía bruscamente, la curvatura de las superficies de nivel también presenta variaciones bruscas. Esta condición tiene importante significado para el

estudio de la figura del geoide. Su superficie atraviesa masas de diferentes densidades (Desdin, 2009).

La curvatura del geoide cambia a saltos ante todo en la orillas de los mares y océanos y también allí donde el geoide atraviesa rocas de diferentes densidades. Al mismo tiempo, todas las superficies de nivel y el geoide como una de estas superficies, no presentan discontinuidades en ningún lugar, esto se deduce de la continuidad del potencial de la fuerza de gravedad (Zakatov, 1981).

En los trabajos geodésicos se hace necesario reducir las mediciones directas al elipsoide de referencia, para ello es necesario conocer en todos los puntos la desviación relativa de la vertical, lo cual obliga a determinar un modelo del geoide.

Frecuentemente recurrimos al auxilio del GPS para las redes de control y para tal efecto se necesita conocer las alturas, las cuales no son posibles sin el auxilio de un modelo de geoide.

Los modelos del geoide utilizados a nivel internacional están asociados a un elipsoide de revolución, al cual corresponde un datum vertical determinado; los más conocidos son:

- EGM 96
- IBERGE 02006
- EGG 97
- CG 03 C
- IGG 2005
- GCV 04

En Cuba se emplea el modelo EGM 96 ya que tiene asociado el elipsoide de Clark 1866 que pertenece al sistema de referencia WGS 1984, de conjunto con el datum vertical de la República de Cuba.

1.5.1. Métodos para determinar modelos de ondulaciones del geoide

A nivel global existen varios métodos para la determinación de las ondulaciones del geoide, dentro de los más utilizados se encuentran:

- Métodos físicos.
- Método geométrico

Métodos físicos

Los métodos físicos utilizan la aceleración de la fuerza de gravedad en la solución de las tareas geodésicas. Para disponer de un modelado del geoide se precisa conocer el potencial de suficientes puntos, que luego permita generar un modelo de curvas isoanómalas. Las perturbaciones al potencial son causadas por las anomalías de la gravedad y son las generadoras de las ondulaciones del geoide, para determinar el potencial de perturbación se deben emplear las anomalías de la fuerza de gravedad, para cuya obtención es imprescindible el levantamiento gravimétrico (Acosta, 2001).

Método geométrico

Si en la zona de trabajo existe una suficiente cantidad de puntos fijos, altimétricos, de la red geodésica nacional o creados por trabajos de densificación, empleando la nivelación geométrica y trigonométrica, de los cuales se conocen los valores de las cotas, se pueden determinar las alturas elipsoidales (según ecuación 1.1), empleando los GPS; las diferencias entre ambos valores

representarán las ondulaciones del geoide dentro de la zona de estudio (Acosta, 2001).

$$N = h - H \quad (1.1)$$

Donde:

N : Ondulaciones del geoide

h : Altura elipsoidal obtenida con GPS

H : Altura ortométrica obtenida por nivelación geométrica o trigonométrica.

1.6. La tecnología de estaciones totales y GPS en la minería y su impacto en Cuba

El hombre, al utilizar la nueva tecnología de instrumentos topogeodésicos, debe justificar su uso con las potencialidades en función de obtener mayor productividad y calidad en el desarrollo de su trabajo y para ello necesita un conocimiento tanto científico como técnico.

En Cuba los parámetros técnicos de medición vigentes limitan las potencialidades, estableciendo dos métodos para la obtención de las coordenadas de los puntos de apoyo, poligonometría y nivelación. Por su parte, el sistema de posicionamiento global está limitado en la obtención de las coordenadas altimétricas debido a la no determinación de un modelo de ondulaciones del geoide que permita obtener los valores de las cotas de puntos sobre la superficie con exactitud en los yacimientos de la región minera de Moa.

Las estaciones totales y los GPS se introdujeron a partir de la década del 90, precisamente en la industria del níquel, en la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel (CEPRONIQUEL), posteriormente se fueron sumando profesionales de las minas de las plantas de níquel Comandante Ernesto Che Guevara, Pedro

Sotto Alba y Rene Ramos Latour, logrando adquirir experiencias empíricas que posteriormente fueron transmitidas a especialistas de GEOCUBA para la creación de metodologías de trabajo que a partir del año 2000 fueron transmitidas a las empresas del frente nacional de proyectos.

1.7. Principales características de los softwares utilizados en la modelación de coordenadas espaciales

La modelación de coordenadas espaciales parte de la generación de un modelo de superficie 3D, que se fundamenta en una representación digital de entidades, ya sea real o hipotética en un espacio tridimensional, se pueden crear a partir de una amplia variedad de fuentes de datos, suele derivarse o calcularse mediante algoritmos especialmente diseñados para ello, que toman datos de puntos, de líneas o de polígonos como muestra y los convierte en una superficie 3D digital (Batista, 2012). A continuación se muestran las principales características de los softwares empleados en la investigación para la modelación.

Cartomap

El software Cartomap, de la empresa ANEBA de España, es uno de los más utilizados en el campo de la topografía e ingeniería en muchos países. Dispone de herramientas específicas de topografía: poligonales, taquimetría, curvas de nivel, áreas y volúmenes. Cuenta, además, con herramientas específicas de diseño de carreteras, ensanches y mejoras de vías existentes; es una potente e intuitiva aplicación que facilita las tareas de proyectos y ejecución de obras de ingeniería civil, urbanismo y minería. Abarca el ciclo completo, desde la toma de datos procedentes de diversas fuentes (estaciones totales, GPS, ficheros dxf) hasta la obtención de planos, vistas en planta, perfiles longitudinales y

transversales. La comunicación con otros sistemas es muy flexible, gracias a la exportación en formato de texto y gráficos compatibles con los estándares del sector.

AutoCAD Civil 3D

AutoCAD Civil 3D es un programa que permite realizar una amplia gama de tareas relacionadas con la ingeniería civil, la topografía, minería y el dibujo, con el software AutoCAD Civil 3D se puede crear relaciones inteligentes entre objetos de dibujos para que los cambios realizados en el diseño se actualicen dinámicamente, también ayuda a optimizar el desempeño del proyecto con análisis geoespaciales, para identificar el mejor sitio del proyecto y realizar un estudio pluvial para diseños más sostenibles, cálculos dinámicos y modelaciones 3D.

ArGIS

Es un software (SIG) para visualizar, crear, manipular y gestionar información geográfica, estos corresponden a lugares, direcciones, posiciones en terreno, áreas urbanas y rurales, regiones y cualquier tipo de ubicaciones en áreas determinadas. Esta información es trabajada de manera sistémica, lo que representa una diferencia sustancial relacionada al trabajo con planos y mapas, permitiendo explorar, ver y analizar los datos según parámetros, relaciones y tendencias que presenta la información, teniendo como resultado nuevas capas de información, mapas y bases de datos.

1.8. Análisis de los trabajos precedentes relacionados con la temática a nivel internacional

En el IV curso GPS para Geodesia y Cartografía, desarrollado en Cartagena de Indias, Colombia, en el año 2003 (Dalda *et al.*, 2003), se define al geoide como la superficie de referencia más próxima al nivel medio del mar, que debido a la distribución no homogénea de las masas en el cuerpo de la tierra y las perturbaciones provocadas por la densidad de la corteza terrestre toma una forma irregular. En el curso se muestra de manera simplificada un procedimiento para la determinación de un modelo del geoide global, a partir de estudios gravimétricos que especifican las zonas donde es posible lograr precisiones en la determinación de las alturas hasta 10 cm, pero no aseguran la exactitud de los resultados en todos los países, además se aborda sobre la existencia de varios modelos del geoide a nivel mundial y algunos a nivel de países, todos referidos a un elipsoide de referencia y un datum vertical, solo ilustran los países que se utiliza como proyección cartográfica UTM.

Marcelo (2011), en su artículo titulado *Algunas consideraciones sobre las alturas ortométricas y normales*, plantea que es posible obtener alturas ortométricas más exactas que las alturas normales. "Nuestra conclusión es que la altura ortométrica, y como consecuencia, el geoide, puede obtenerse tan exactamente como la altura normal. Se ha mostrado que muchos de los argumentos históricos en contra de ambas alturas son erróneos: originados por conceptos erróneos o han sido refutados por avances científicos y tecnológicos, al igual que por la gran disponibilidad de datos de distinta variedad; por tanto, las tendencias para desacreditar cualquiera de ellas es la solución más tradicional de Stokes, a partir

de la integración de modelos de anomalías o la alternativa de Molodensky con el estudio de las alturas normales, están fuera de lugar y si ambas son igualmente exactas, por qué no usar una que respete la física y satisfaga los requerimientos prácticos y científicos”.

Alfonz (1984) establece el algoritmo de cálculo de las correcciones por la curvatura de la tierra y refracción solar, factores que influyen en los resultados de las mediciones de campo ocupando una zona extensa; considera que para cada región deben de calcularse estas correcciones que están en función de las relaciones entre la diferencia de alturas y el nivel medio del mar. En las mediciones de campo con las nuevas tecnologías de estaciones totales y GPS es fundamental el conocimiento de estas correcciones.

Froment (2009), en su artículo acerca de las *Especificaciones técnicas para los levantamientos topográficos con estación total* define las poligonales en tres clases o tipos: poligonal abierta, cerrada y amarrada, realizando una valoración de las condiciones idóneas para el empleo de uno u otro tipo. Además, cita los métodos de cálculo para cada itinerario, haciendo énfasis en los trabajos de gabinete hacia la solución de los resultados de registros de campo tomados con estación total. Usa como herramienta bases de datos tomadas en el terreno para la elaboración matemática de las mediciones y obtener las coordenadas de los puntos de apoyo, después de realizar la tarea de ajuste donde refiere los métodos de mínimos cuadrados y ajuste proporcional a la longitud de los lados; esto posibilitó al autor brindar recomendaciones para lograr el cierre de las poligonales. Este artículo, aunque incorpora en la poligonometría la nueva

tecnología de estaciones totales, solo se centra al cálculo y ajuste de las coordenadas planimétricas y no estudia las coordenadas altimétricas.

Sánchez (2010) diseña una metodología para el cálculo de las poligonales o itinerario considerando los valores planimétricos y altimétricos de los puntos a determinar con estaciones totales; hace una valoración de los errores de cierre obtenidos mediante el cálculo, pero no tiene en cuenta las posibles desviaciones que se pueden cometer durante las mediciones directas en campo. Aporta un conjunto de criterios a considerar durante la determinación de las alturas de los puntos, basándose en el fundamento del método de la nivelación trigonométrica compuesta. Las principales críticas a este método se basan en la exactitud de los resultados obtenidos, según las instrucciones técnicas para levantamientos topográficos de 1987 del Ministerio de la Construcción de la República de Cuba. Este método solo es aceptable para la obtención de planos topográficos con equidistancias mayores a 2 m, sin embargo, la metodología refiere que puede ser utilizada para la obtención de planos de equidistancias menores e incluso para el replanteo de objetos de obra.

Por su parte, Franco (2008) en su artículo *Nociones de Topografía, Geodesia y Cartografía*, acerca del empleo de estaciones totales escribe: " La combinación de los equipos informáticos e instrumentos topográficos, el desarrollo de avanzados programas de cálculos topográficos y modelos digitales del terreno, la utilización ya generalizada de estaciones totales permiten la obtención de precisiones antes solo alcanzadas por métodos geodésicos". Se refiere a la hipótesis de realizar los trabajos de levantamiento topográfico en paralelo con las mediciones de los puntos de apoyo y luego transformar, aplicando el método

Helmert, las coordenadas de todo el trabajo una vez realizado el ajuste de la poligonal con la ayuda de un software de cálculo topográfico; criterio que difiere de la tesis de Froment (2009), donde establece la necesaria elaboración matemática de las mediciones para obtener los puntos de apoyo con la exactitud que permitan posteriormente realizar los trabajos topográficos. El autor realiza una sintaxis sobre los softwares topográficos actuales empleados para el cálculo de poligonales e ilustra varios ejemplos que facilitan el aprendizaje, además, muestra todo un algoritmo de cálculo hasta la obtención de los principales errores obtenidos durante el procesamiento, pero no define criterio alguno de los valores permisibles para cada tipo de poligonal.

López (1996) aborda la temática sobre el ajuste de poligonales cerradas, donde hace referencia a los métodos de ajustes siguientes: regla de la brújula, regla del tránsito, método de Crandall, método de los mínimos cuadrados. El autor realiza una comparación entre los métodos teniendo en cuenta la complejidad y los criterios de corrección que maneja cada uno y considera los mínimos cuadrados como el más apropiado para la poligonometría ya que asigna dentro de su procedimiento un peso relativo a las medidas angulares y otro a las medidas lineales, ajustando de la manera más imperceptible las longitudes y los rumbos de sus lados. Deja claro la complejidad y lo extenso del proceso de cálculo pero con el advenimiento de las computadoras ha pasado de una desventaja a una particularidad.

Ochoa (1997), en la tesis para obtener el título de Ingeniero Civil en la Universidad de Sonora, realiza el ajuste de poligonales por el método de mínimos cuadrados, donde aporta el fundamento matemático llevado a lenguaje de

programación Autolisp, para crear una aplicación en Autocad, que permita realizar los ajustes correspondientes a las mediciones de campo. Coincide con la tesis de López (1996), en que el método de mínimos cuadrados es el más apropiado para el ajuste sobre la resolución de la misma poligonal por varios métodos y la comparación de los resultados le permitieron evaluar la exactitud y obtener el criterio sobre el más adecuado.

El manual de ingeniería de la Armada de los EEUU, *Engineering and Design Topographic Surveying* (1994), establece un conjunto de criterios sobre el control de la calidad de los trabajos topográficos en la etapa de creación de puntos de apoyo, levantamiento directo en campo, diseño, control de deformaciones horizontales y verticales; se definen los principales conceptos de estaciones totales y poligonometría, así como el algoritmo de cálculo para poligonales abiertas, cerradas, orientadas en dos puntos extremos y de rodeo. Además, valora los posibles errores que pueden cometerse con la estación total durante los trabajos de campo y la obtención de las desviaciones después de realizado el cálculo. Se puntualiza sobre la tecnología moderna de estaciones totales integradas con sistema de posicionamiento global (GPS) y su uso en la densificación de redes de apoyo, fundamentalmente en el método de trilateración, utilizado en grandes extensiones, tarea de la cual se ocupa la Geodesia, adoleciendo de información sobre itinerario de poligonales. Generalmente se hace alusión a parámetros que se deben considerar durante el cálculo, normados en este manual, pero es poca la información sobre aspectos técnicos a desarrollar en el terreno.

Hundiel (2008) en el *Manual de Topografía* escribió: "Para el cálculo de las mediciones con estación total, en la determinación de vértices geodésicos por el método de itinerario o poligonal, es posible emplear software interno del instrumento para llevar a cabo la tarea de ajuste". Describe todo el proceso para realizar la compensación de la poligonal directamente en el campo con el software de estación total Sokkia Set 3010, refiriendo todo el proceso de medición en campo al manual de usuario del instrumento, donde existe el procedimiento pero no deja claro las tolerancias admisibles en el proceso de medición, así como el resultado de los errores obtenidos durante el cálculo.

Fargas (2001) en su artículo *Redes topográficas*, define la poligonometría como el método de densificación más utilizado en la topografía por ser económico y que puede adaptarse a cualquier complejidad de la zona de trabajos, pero solo teniendo en cuenta la planimetría; considera emplear el método de nivelación para obtener las coordenadas altimétricas. Además, establece una metodología para el cálculo de poligonales cerradas y la obtención de los errores altimétricos y planimétricos, sin considerar la tarea de ajuste. Hace un análisis sobre diferentes sistemas de referencia utilizados en Europa y la necesidad de lograr homogenizar en un sistema único global, que permita el empleo del sistema de posicionamiento global a nivel mundial en uno solo.

Batrakov (1987) plantea un algoritmo de cálculo matricial para la obtención de las etapas de desarrollo de la poligonometría, a partir de poligonales de I orden de precisión; relaciona la influencia del error angular y lineal durante el desarrollo de la poligonometría y hace una valoración sobre la longitud límite de la poligonal fundamentado en los parámetros obtenidos en la teoría de Ganshin (1977).

Plantea calcular la precisión de las poligonales trazadas entre puntos de apoyo y demuestra que el mayor error relativo se encuentra en estas mismas poligonales y establece que, en los levantamientos en superficies abiertas o en terrenos contruidos a escala 1: 5 000, el error límite de posición de los puntos de la base de levantamiento es de 0,1 m.

1.9. Análisis de los trabajos precedentes relacionados con la temática en Cuba

Acosta (2001), del Grupo Empresarial GEOCUBA, creó el modelo del geoide Cuba 2000, a partir de los datos disponibles sobre la base de la adopción del método combinado de mejoramiento de los modelos geopotenciales, el uso de determinaciones GPS y de las diferencias entre las superficies de referencia ideal y el datum vertical de la República de Cuba; demostró que las diferencias obtenidas en el modelo reflejan fielmente los errores de transmisión de las ondulaciones del geoide mediante la NAG.

Acosta (2002) presentó una metodología para la nivelación GPS en las condiciones de la República de Cuba donde, mediante el uso de los modernos modelos gravitacionales de la tierra y del modelo del geoide Cuba 2000, determinó las diferencias de altitudes normales entre los puntos sobre la superficie de la tierra, utilizando las altitudes elipsoidales h , medidas con receptores GPS, las diferencias entre las ondulaciones del geoide en dichos puntos (previamente corregidas por la influencia del campo gravitacional) y la variación de las diferencias entre las desviaciones astrogravimétricas de la línea vertical. Logró la transmisión de las altitudes hacia los puntos experimentales coincidentes con puntos de nivelación geométrica a distancias desde 4,4 hasta

194 km, mediante la nivelación GPS para las condiciones de la República de Cuba, con exactitudes desde $\pm 48,82$ hasta $\pm 0,04$ ppm (partes por millón) o milímetros por kilómetros respectivamente; que clasifican dentro de todos los órdenes de nivelación geométrica. Pero, además, reconoce que en las zonas montañosas y con un relieve ondulado no es posible que la exactitud de los resultados esté dentro de los órdenes de la nivelación geométrica.

Acosta (2009), en su tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas, para la determinación de índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos, utiliza líneas de nivelación de alta precisión para obtener los valores de deformaciones de objetos de obra en el plano vertical, pero utiliza instrumentos ópticos mecánicos y logra realizar un ajuste riguroso de las observaciones de los puntos de apoyo donde lo define como ramillete; recomienda para próximas investigaciones la utilización de estaciones totales y GPS.

Arango (1983) crea en su libro una metodología para la medición y cálculo de la nivelación trigonométrica y cómo eliminar los errores introducidos en las mediciones por curvatura y refracción, pero no define las tolerancias admisibles para cada orden de precisión del punto a determinar, es decir, considera todas las mediciones en una sola precisión y realiza la corrección de curvatura y refracción de los parámetros definidos a nivel global. No hace una descripción de los elementos para asumir el valor de las correcciones que propone, realiza una caracterización de la instrumentación utilizada en la época en profundidad, reflejando las verificaciones que deben realizarse antes de ejecutar cualquier

trabajo. Propone una serie de tablas taquimétricas para facilitar los cálculos en el terreno.

Olivera (2010) en el V Congreso Internacional de Agrimensura analiza a priori la precisión de las estaciones totales para tener criterio de selección del instrumento de acuerdo a la precisión de fabricación y el resultado de la elaboración matemática de las mediciones geodésicas, considerando criterios de la relación existente entre el error angular horizontal y lineal transversal, la acción conjunta en el resultado de los errores angulares y lineales y la relación entre el error angular vertical y el desnivel, todo este algoritmo y análisis de errores admisibles para la construcción y el montaje facilitan al profesional de la topografía tener criterio sobre si es óptima la utilización de la estación total o hay que recurrir a otra más precisa; además escribe:

Es importante que el topógrafo, y sobre todo el ingeniero tecnólogo, tenga presente que disponer de una estación total no equivale, ni jamás significa que puede realizar cuanto trabajo desee. Es necesario apreciar los errores y posibilidades de la estación total que posee, y en base a ella, proyectar correctamente su uso. No en balde los fabricantes han diseñado una gama de estaciones totales: precisa, media, y ordinarias. Cada una tiene su campo de empleo, saberlo aplicar significa profesionalidad. Plantea además: si la estación total que usted posee no garantiza la exactitud requerida, entonces debe utilizar los métodos tradicionales, por ejemplo: Teodolito Leica T3 o T2, cinta métrica de invar, nivel óptico Leica N3, NA2 con placas plano paralelas, etc. Pero recuerde, que para el empleo de estos medios es necesario también realizar los cálculos a priori de exactitud.

Las instrucciones técnicas para levantamientos topográficos a escalas: 1:2000, 1:1000, 1:500, año 1987, es el documento técnico rector que rige la política de la topografía en Cuba. Define los parámetros técnicos poligonométricos de nivelación geométrica y establece las normas para levantamiento directo de campo.

Desdin (2009), en su tesis en opción al título de Doctor en Ciencias Técnicas para caracterizar los movimientos horizontales recientes de la corteza terrestre en la región de Mayarí, Nícaro y Moa, con el empleo de tecnología de punta GPS, establece polígonos geodinámicos para la región niquelífera de Holguín que van ser utilizados como puntos de origen para la poligonometría en la minería y otras ramas de la economía.

Belete (1998), en su tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, realiza un análisis detallado del control del volumen de mineral extraído y la masa volumétrica; refleja de manera crítica el estado de los trabajos topográficos, creando una metodología para la valoración de los errores cometidos durante la realización del levantamiento, pero de manera clara plantea en sus recomendaciones que el empleo de las nuevas tecnologías de instrumentos topográficos y software de cálculo van a minimizar los errores relacionados en su investigación, incitando a continuar los experimentos con el sistema de posicionamiento global y estaciones totales para llegar a atenuar las diferencias del volumen de mineral extraído y el que se reporta por la planta procesadora, que en aquella época y la actual afecta los resultados productivos.

La empresa Geocuba en el año 2008 elaboró una metodología para el levantamiento topográfico a grandes escalas con estación total Leica 805, en ella

se establecen valores admisibles en el levantamiento topográfico, así como se incorpora un parámetro de medición de distancia máxima del instrumento al prisma de 1 000 m, pero no deja claro el fundamento teórico para la obtención de este parámetro.

Herrera (2012), en su tesis en opción al título de Máster en Ciencias, para la determinación del coeficiente conjunto de curvatura y refracción en los yacimientos lateríticos cubanos, realizó mediciones experimentales empleando estaciones totales, donde obtuvo resultados confiables que sirvieron de base en esta investigación. Demuestra que en las condiciones de las minas en la región de Moa este coeficiente no se ajusta al estándar propuesto en Cuba, lo cual permite mitigar los errores en las mediciones.

Por su parte, Pérez (2004), en su tesis de maestría, plantea que “la incidencia de los factores meteorológicos en cualesquiera de las condiciones climáticas que pudieran presentarse en el territorio nacional, para los trabajos de levantamientos topográficos a las escalas 1:2 000, 1:1 000 y 1:500, son despreciables”. Realiza un análisis de nuevos parámetros técnicos para las mediciones con estaciones totales bajo el principio de condiciones ambientales, sin tener en cuenta la influencia de las coordenadas espaciales.

1.10. Conclusiones parciales

Después de realizado un análisis crítico del estado actual y perspectivas de la nueva tecnología se ha llegado a una serie de conclusiones que ilustran la necesidad y validez científica de la investigación que se describe en la presente tesis:

1. La tendencia actual para la realización de los trabajos de la topografía minera e implementación del proyecto de máxima prioridad del estado de la minería de precisión en yacimientos lateríticos cubanos está enfocada a la utilización de nuevas tecnologías de estaciones totales y GPS.
2. Los parámetros técnicos vigentes para los trabajos topográficos en la minería fueron determinados en el año 1987, respondiendo a las necesidades de la tecnología de los instrumentos topogeodésicos ópticos mecánicos, lo cual presenta la limitante de no lograr la explotación de las estaciones totales de acuerdo a las potencialidades para la cual están diseñadas.
3. En Cuba no existe gran desarrollo en la determinación de alturas de puntos con el empleo del sistema de posicionamiento global.

CAPÍTULO II

**PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE COORDENADAS
ESPACIALES EN LA REGIÓN MINERA DE MOA**

CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE COORDENADAS ESPACIALES EN LA REGIÓN MINERA DE MOA

2.1. Contenido

El presente procedimiento contiene la secuencia de los trabajos de campo y gabinete para la modelación de coordenadas espaciales en la región minera de Moa; se estructura en dos etapas fundamentales:

- Determinación de los parámetros técnicos de medición para las estaciones totales, a partir de la modelación de coordenadas espaciales.
- Modelación de las ondulaciones del geoide en la región minera de Moa, para la determinación de las coordenadas espaciales con la tecnología GPS.

En la figura 2.1 se muestra el flujograma de trabajo que relaciona los pasos a seguir en el procedimiento. Está concebido para el empleo de la nueva tecnología de instrumentos topogeodésicos que se utiliza en la región minera de Moa y perspectivas futuras:

- Estaciones totales
- Sistema de posicionamiento global
- Estaciones totales integradas: aún no se cuenta con esta tecnología pero está prevista en los planes de inversiones futuros en la industria del níquel.

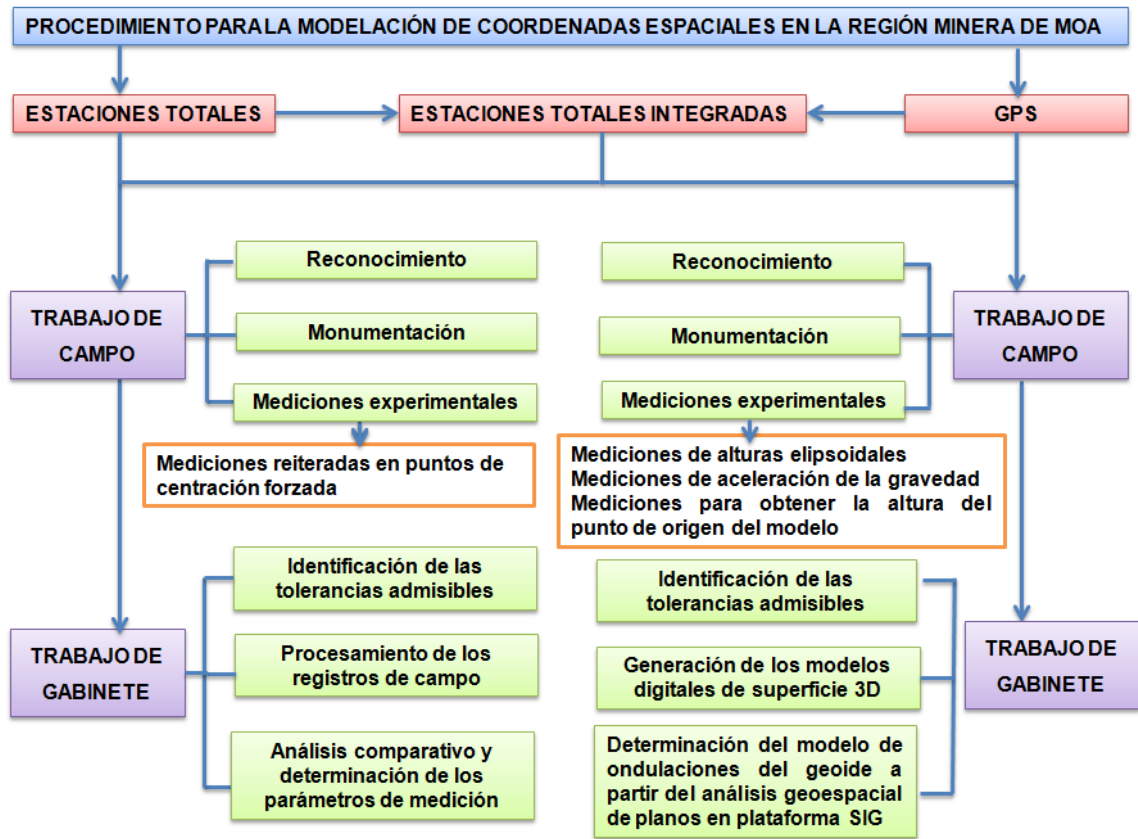


Figura 2.1. Flujograma que describe el procedimiento.

2.2. Propósito

El procedimiento tiene el propósito de modelar coordenadas espaciales y definir parámetros técnicos de medición para la utilización eficiente de estaciones totales y GPS.

En la tecnología estaciones totales se muestran los pasos para fusionar los métodos de densificación poligonometría y nivelación en un método que permite obtener las coordenadas espaciales de acuerdo a las tolerancias admisibles que exigen los trabajos en la minería, así como determinar nuevos parámetros de medición para explotar al máximo las potencialidades del instrumento.

En el sistema de posicionamiento global se muestran los pasos para determinar un modelo de ondulaciones del geoide local, el cual permite garantizar la determinación de coordenadas espaciales de puntos sobre la superficie terrestre con la exactitud que requieren los trabajos de la topografía minera y así ampliar su empleo en los trabajos topográficos mineros.

2.3. Alcance

El presente procedimiento está destinado para ser empleado en los trabajos topográficos de la minería en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa. El campo de aplicación se centra en los trabajos siguientes:

- Densificación de redes de poligonales planimétricas y altimétricas.
- Control de volúmenes de mineral extraído.
- Marcación y amarre de pozos para la red de exploración geológica y explotación minera.
- Levantamiento topográfico para la ejecución de proyectos de canteras escombreras, caminos mineros, proyectos medioambientales y otros.
- Replanteo de obras mineras.
- Marcación para desbroce.
- Marcación de límites de concepciones mineras.

2.4. Responsabilidad y autoridad

Son máximos responsables de la correcta aplicación del procedimiento, los especialistas principales de los departamentos de topografía que laboran en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa. Los controladores de calidad de cada departamento son responsables del chequeo directo en campo y gabinete de lo establecido en el documento.

Las revisiones realizadas al procedimiento deben dejarse debidamente referenciadas, respetando el derecho de autor a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.

2.5. Descripción de las actividades de la primera etapa del procedimiento

La determinación de nuevos parámetros técnicos para el empleo de las estaciones totales en la región minera de Moa permite lograr una mayor productividad en los servicios topográficos mineros, aumentando las distancias a medir respecto a los parámetros vigentes y fusionando dos métodos de medición en uno fundamentado en coordenadas espaciales. A continuación se presentan los pasos a seguir en esta etapa:

1. Trabajos de campo.
2. Trabajos de gabinete.

2.5.1. Trabajos de campo

Se realizan un conjunto de trabajos directamente en el campo para seleccionar las áreas de los experimentos, ubicar los puntos o monumentos topográficos de referencia y realizar mediciones experimentales periódicas.

- Reconocimiento.
- Monumentación.
- Mediciones experimentales.

Reconocimiento

Se realiza directamente en el terreno dentro de la zona de estudio, con el objetivo de seleccionar las áreas para los experimentos donde existan las condiciones más desfavorables del relieve, grandes pendientes, alteración del relieve por los trabajos mineros, grandes taludes, plataformas, etc. Es importante realizar una

revisión de trabajos anteriormente ejecutados y conocer las perspectivas futuras a desarrollar en el área seleccionada para garantizar la durabilidad, por el período de un año, de los puntos experimentales a ubicar sobre la superficie terrestre.

Monumentación

Es necesario solicitar el servicio de la empresa Geocuba, perteneciente al organismo MINFAR, la construcción y medición de puntos experimentales (monumentos topográficos) de centración forzada (anexo 1), con un cuarto orden de precisión en coordenadas espaciales.

Deben construirse, como mínimo, cuatro puntos que conformen una cadena de triángulos, siempre que sea posible a diferentes niveles (Sánchez, 2010). Las distancias entre los lados de los monumentos deben encontrarse en el rango de las distancias mínimas y máxima que puede medir la estación total, según certificado del fabricante, esto permite seleccionar distancias patrones para realizar los experimentos.

Si el alcance máximo en las mediciones de una estación total por su certificado es de 1 500 m, se pueden distribuir las distancias patrones a partir de cero cada 500 m hasta sobrepasar su alcance; es importante establecer al inicio de la primera sección, es decir, de 0 a 500 m, una distancia menor que puede llegar hasta los 100 m, con el objetivo de comprobar la efectividad de las mediciones en un rango que no afecte la curvatura y refracción terrestre. En el último intervalo, es decir, de 1 000 m a 1 500 m, es importante establecer un rango de distancia intermedia, que sea menor o aproximadamente igual a la media del intervalo.

Mediciones experimentales

Se realiza un inventario sobre el tipo de estaciones totales que se utiliza en la región de estudio para seleccionar la de menor precisión, con el objetivo de determinar los nuevos parámetros y estos puedan ser cumplidos por instrumentos de mayor precisión. El experimento consiste en medir coordenadas y distancias entre puntos seleccionados de forma reiterada, para lo cual se estaciona el instrumento en todos los monumentos experimentales y se observa a las disímiles direcciones utilizando el método de todas las combinaciones posibles.

Para tener criterio de la cantidad de experimentos que se necesitan realizar para obtener los resultados esperados, se diseñan experimentos, utilizando el método plan factorial (Hernández *et al.*, 2007), fundamentado en la expresión 2^n , donde n es la cantidad de variables que intervienen en el experimento.

En cada experimento para determinar la cantidad de serie de observaciones a realizar se emplea la ecuación 2.1 (Vidueva, 1978). Se deben realizar mediciones que correspondan a un cuarto orden de precisión.

$$K = \frac{m_{\beta}^2}{m_v^2 + \frac{m_o^2}{2}} \quad (2.1)$$

Donde:

K : Cantidad de series de observaciones

m_{β}^2 : Precisión de la medición del ángulo en segundos. Se toma de certificado del instrumento

m_v^2 : Error de colimación en segundos. Se obtiene aplicando la ecuación 2.2

m_o^2 : Error medio cuadrático de la medición del ángulo. Se toma de la tabla 1 del anexo 2.

$$m_v^2 = \frac{30''}{v} \quad (2.2)$$

Donde:

v : Aumento del anteojo. Se toma de certificado de instrumento.

Las mediciones se realizan en cuatro ciclos durante un año, tratando de buscar los horarios de las condiciones ambientales más extremas en las minas. En el anexo 3 se muestra un ejemplo del registro que debe utilizarse para procesar la información.

Como coeficiente conjunto de curvatura y refracción se emplea 0,20, determinado en investigaciones anteriores (Herrera, 2012).

2.5.2. Trabajos de gabinete

Para el procesamiento de la información obtenida como resultado de las mediciones experimentales de campo se deben realizar los siguientes pasos:

- Identificación de las tolerancias admisibles.
- Procesamiento de los registros de campo.
- Análisis comparativo y determinación de los parámetros técnicos de medición.

Identificación de las tolerancias admisibles

Se realiza un estudio de las normas, instrucciones y procedimientos vigentes en la minería, con el objetivo de seleccionar las tolerancias admisibles mínimas en coordenadas espaciales que deben cumplir los diferentes trabajos (Batista, 2012).

El caso de los métodos de densificación, poligonometría y nivelación fueron fusionados en un método planoaltimétrico. La tabla 2.1 muestra las tolerancias admisibles en coordenadas espaciales para estos trabajos en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa.

Tabla 2.1. Tolerancias admisibles en coordenadas espaciales para poligonales

Distancias (m)	IV Orden (m)	I Categoría (m)	II Categoría (m)	Técnica (m)
< 100	0,007	0,019	0,026	0,052
100- 500	0,024	0,061	0,105	0,252
500-1 000	0,045	0,112	0,206	0,502
1 000- 1 200	0,053	0,132	0,246	0,602
1 200-1 500	0,065	0,162	0,306	0,752

La tabla 2.2 muestra las tolerancias admisibles en coordenadas espaciales para levantamientos topográficos a escala 1: 2 000, 1: 1 000 y 1:500, en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa.

Tabla 2.2. Tolerancias admisibles para la determinación de coordenadas espaciales en levantamientos topográficos

Escala	De importancia espaciales (m)	En zonas llanas espaciales (m)	En zonas montañosas espaciales (m)
1:500	0,26	0,30	0,39
1:1 000	0,52	0,60	0,77
1:2 000	1,04	1,20	1,55

Procesamiento de los registros de campo

Se procesan todas las mediciones de coordenadas planimétricas, cotas y distancias entre los puntos experimentales, realizadas en los cuatro ciclos de observación, determinando el promedio de las observaciones para cada punto en

coordenadas espaciales y para cada lado de distancia medidas entre monumentos (ecuación 2.3).

$$Pm = \frac{\sum M}{n} \quad (2.3)$$

Donde:

Pm : Promedio de las mediciones (coordenadas o distancias)

$\sum M$: Sumatoria de las mediciones realizadas en los ciclos de observación (coordenadas o distancias)

n : Cantidad total de mediciones.

Para obtener las desviaciones entre los valores patrones de los puntos experimentales y el valor promedio de las observaciones realizadas en los experimentos se aplica la ecuación 2.4.

$$\partial m = V_p - Pm \quad (2.4)$$

Donde:

∂m : Desviaciones

V_p : Valor patrón de los puntos experimentales.

Análisis comparativo y determinación de los parámetros técnicos de medición

Se realiza un análisis comparativo de las principales desviaciones obtenidas en la realización de los experimentos con las tolerancias admisibles identificadas por las normas, procedimientos e instrucciones. Se realiza en software Microsoft Office Excel un gráfico de línea en forma apilada donde se ubican en el eje de las X las distancias patrones y en el eje de las Y las desviaciones en las mediciones.

En el gráfico se pueden identificar los rangos de distancias donde se encuentran las mayores y menores desviaciones; se seleccionan como parámetro técnico de medición aquellas distancias donde la línea que representa las desviaciones obtenidas en los experimentos se encuentra más alejada de la línea que representa un orden de precisión en las poligonales o un parámetro establecido, según norma para levantamientos topográficos (anexo 4).

2.6. Descripción de las actividades de la segunda etapa del procedimiento

La determinación de las coordenadas altimétricas, empleando la tecnología GPS, requiere un estudio de las ondulaciones del geoide de la región que se estudia, para lograr mayor exactitud en el resultado de las mediciones, el procedimiento establece el método combinado para la determinación de las ondulaciones del geoide. A continuación se presentan los pasos a seguir en esta etapa:

1. Trabajos de campo.
2. Trabajos de gabinete.

2.6.1. Trabajos de campo

Con los resultados de investigaciones anteriores (geodinámicas, geofísica, geodésicas, hidrográficas y topográficas) se realizan un conjunto de trabajos de campo con el objetivo de obtener el modelo de ondulaciones del geoide de la región de estudio. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Reconocimiento.
- Monumentación.
- Mediciones experimentales.

Reconocimiento

Se realiza directamente en el terreno teniendo en cuenta ubicar dentro de la zona de estudio los lugares de mayor deformación del geoide. Se deben consultar los resultados de proyectos e investigaciones realizadas anteriormente en el área de trabajo que tributen informaciones relacionadas con estudios gravimétricos, topográficos y geológicos. Es importante tener en cuenta que los lugares de mayor deformación del geoide se encuentran a la orilla de los mares y océanos y donde existan rocas de diferentes densidades (Dalta *et al.*, 2003). Se delimita el área que ocupará el modelo de ondulaciones del geoide referenciando las coordenadas de los vértices al sistema nacional.

Monumentación

Para la ubicación de los puntos experimentales es necesario revisar si en la zona existen monumentos que se encuentren referenciados al sistema de alturas nacionales con una precisión de primera categoría o mayor, de no existir se debe solicitar su ubicación y medición por parte de la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel. Se debe garantizar una densidad de forma homogénea por toda el área de trabajo, con una distribución de un punto como mínimo cada ocho hectáreas.

Como punto de origen del modelo de ondulaciones del geoide se selecciona siempre que sea posible, uno de los puntos de la red geodésica nacional existente, en caso contrario se debe construir un punto que contenga valores de coordenadas de orden superior a los monumentos experimentales.

Mediciones experimentales

Para realizar las mediciones experimentales es necesario contar con un equipamiento geodésico apto para el uso, conociendo sus valores de incertidumbres determinados en laboratorios metrológicos. Se debe contar con dos receptores GPS de doble frecuencia, un nivel óptico o digital y se construye un péndulo simple para realizar las mediciones de aceleración de la gravedad; al ser construido este instrumento es necesario determinar su valor de incertidumbre, ver epígrafe 2.6.1.1. Las mediciones a ejecutar en campo en esta etapa son las siguientes:

- Mediciones de alturas elipsoidales.
- Mediciones de aceleración de la gravedad.
- Mediciones para obtener la altura del punto origen del modelo.

Mediciones de alturas elipsoidales

En las mediciones de las alturas elipsoidales se utiliza el método estático diferencial, ubicando un receptor GPS como base en el punto de origen del modelo y otro instrumento como móvil en cada uno de los puntos topográficos de apoyo utilizados para los experimentos. En el proceso de medición debe cumplirse lo establecido en la instrucción ITT- 08 de CEPRONIQUEL:

1. La distancia máxima entre estación de referencia y estación móvil no debe exceder los límites declarados en los certificados del fabricante.
2. Las condiciones de la geometría de los satélites GDOP, para todo tipo de receptor GPS, debe ser menor de 3,0.

3. El Tiempo de medición para cada punto va a estar en correspondencia con el tipo de instrumento y el tiempo que demora en resolver las ambigüedades. Debe consultarse el manual de usuario.

Durante el trabajo los atributos de los puntos del proyecto, alturas de antena y los datos meteorológicos, al inicio y al finalizar la sesión, deben ser plasmados en el registro de campo (anexo 5).

Mediciones de aceleración de la gravedad

Para llevar a cabo las mediciones de aceleración de la gravedad, se construye un péndulo simple, el cual está compuesto por un hilo de masa despreciable, una plomada física, cinta métrica, un transportador de ángulos metálico, todos fijados a un soporte o riostra y un cronómetro (figura 2.2).

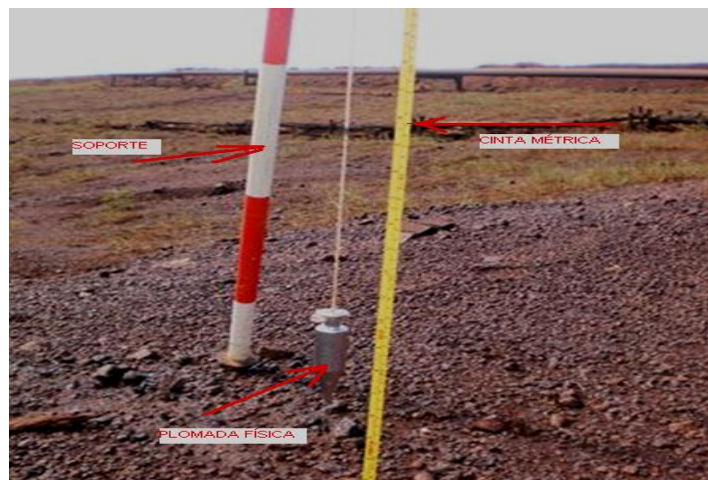


Figura 2.2. Péndulo simple construido para la investigación.

El experimento consiste en determinar la gravedad a partir del estudio de un péndulo simple de hilo. Para ello se miden los períodos de una plomada física de dimensiones conocidas a cinco longitudes diferentes del hilo (Ramírez, 2005). El período se define según la ecuación 2.5.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}} \quad (2.5)$$

Donde:

T : Período

L : Longitud del hilo, (m)

g : Aceleración de la gravedad local, (m/s²)

π : Constante matemática.

Despejando la ecuación 2.5, se obtiene el valor de aceleración de la gravedad por la ecuación 2.6.

$$g = 4\pi^2 \frac{L}{T^2} \quad (2.6)$$

Donde:

T : Se determina según ecuación 2.7

$$T = \frac{t}{n} \quad (2.7)$$

Donde:

T : Período

t : Tiempo transcurrido en una oscilación del péndulo, (s)

n : Cantidad de oscilaciones.

Se miden las dimensiones de la plomada física con un pie de rey. Con ayuda de la balanza electrónica se obtiene el peso. Posteriormente se miden las longitudes del hilo con la cinta métrica y se señala cada intervalo con un marcador permanente. Al marcar el hilo se tiene en cuenta la longitud de la plomada física, porque esta se considera como un cuerpo puntual, involucrando su centro de masa en las longitudes seleccionadas para el experimento: 0,20 m; 0,40 m; 0,60 m; 0,80 m; 1,0 m; respectivamente (Muffatti y Cian, 2007).

Se arma el sistema atando el hilo al soporte o riostra seleccionado, donde se ubicaba el transportador para determinar el ángulo de oscilación del hilo.

Se realizan las mediciones para un metro de longitud en el hilo, se traslada la plomada de manera tal que forme un ángulo de 10° con el eje del soporte, se libera el péndulo desde esa posición y se realiza simultáneamente un control de tiempo de oscilación. El cronómetro se detiene cuando el instrumento registra 10 oscilaciones. El mismo procedimiento se aplica para las restantes longitudes.

La cantidad de experimentos a realizar en cada punto se obtiene a partir del diseño de experimento utilizando el método plan factorial (epígrafe 2.5.1).

Mediciones para obtener la altura del punto de origen del modelo

En los trabajos de campo para obtener la altura del punto de origen de modelo se planifican dos estudios fundamentales:

- Medición y procesamiento de la marea.
- Medición de una línea de nivelación técnica para determinar la altura del punto de origen.

Para la medición y procesamiento de la marea es importante revisar si existe un mareógrafo instalado en la zona de los trabajos que contenga registros continuos de la marea para solicitar información; de no existir se utiliza el método de regla visual de marea.

Se construye una estación mareográfica temporal, conformada por tres reglas de fibra graduadas cada un centímetro, las lecturas sobre varias reglas se utiliza como control, las diferencias de lecturas entre las reglas sucesivas debe coincidir con sus respectivas diferencias de nivel con un error permisible de ± 2 cm (Díaz, 2001). Si esto no ocurre significa que se leyó mal o que las reglas se movieron.

Estos experimentos se realizan en cuatro ciclos de observaciones durante un año.

Para la selección del lugar de ubicación de las reglas visuales de marea se tienen en cuenta los aspectos siguientes (Donofio *et al.*, 1982):

1. Que la marea se propague libremente hasta la regla de forma tal que permita las observaciones de las mayores pleamares y las menores bajamares.
2. La estimación de la amplitud de la marea para evitar que las reglas queden en seco o totalmente sumergidas.
3. El terreno sea firme o sobre cabecera de muelle.
4. Fácil acceso.

Si las reglas se instalan en un muelle, se fijan a los pilotes, si el lugar escogido para su instalación es la costa, se instala clavando en el fondo marino estacas de madera o acero. Si el fondo es duro y no queda firmemente clavado será necesario colocar vientos en la parte superior de la estaca o acero, distribuidos aproximadamente cada 120° de forma tal que el frente de la regla quede libre (Instrucción Oceanográfica No 1, 2005). Ver figura 2.3.

Las alturas de la superficie del agua registradas se refieren a un nivel o plano de referencia en la regla, que se conoce como cero de la estación o también como cero del puesto (Vallejo, 2003).

Se escoge arbitrariamente, pero una vez fijado se toma como único valor, considerando las graduaciones de la regla empleada. Se marca el cero en una lectura que permita observar los valores mínimos alcanzados por la superficie del agua por encima del cero de la regla, garantizando que no se efectúen lecturas

negativas del nivel. Se realiza una nivelación técnica entre las reglas ubicadas con el objetivo de conocer la diferencia de nivel entre ellas, referenciada al cero del puesto (Díaz, 2001).

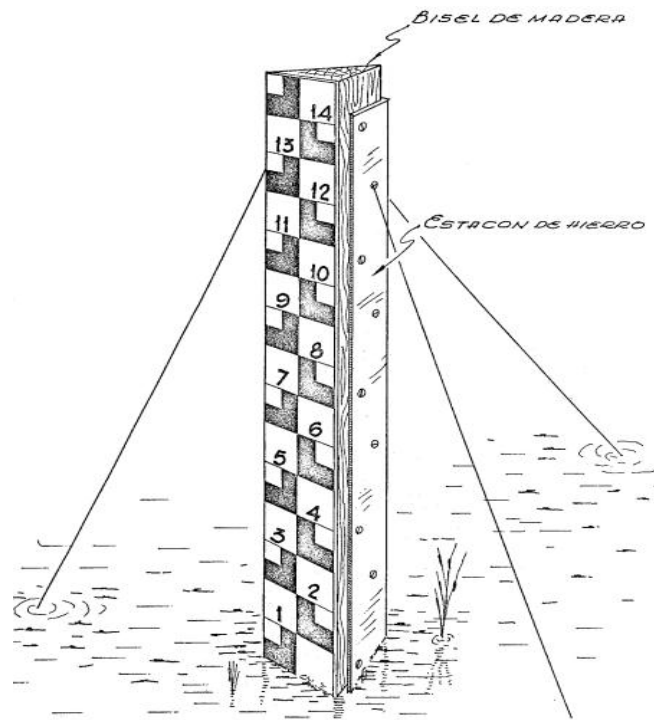


Figura 2.3. Ubicación de la regla visual de marea. (Tomado de Instrucciones Oceanográficas No 1 del 2005).

En la realización de los trabajos de campo para obtener el nivel medio del mar de la zona de estudio es importante tener cuenta dos parámetros fundamentales: la hora y la altura de la marea (Vallejo, 2003).

1. Es obligatorio emplear un reloj sincronizado con la emisora nacional Radio Reloj.
2. Se realizan lecturas en las reglas de marea cada una hora exacta en los momentos de estabilidad del nivel del mar que se produce entre los trenes de ola, completando un período de mediciones desde las 6:30 horas, hasta

las 17:30 horas, por tres días consecutivos en cada ciclo; estas lecturas se anotan en el registro de campo (anexo 6).

3. Para mitigar los errores de observaciones se realizan tres lecturas de los valores más altos de la marea y tres de los más bajos en cada regla; la lectura definitiva resulta el promedio de estas mediciones (ecuación 2.8).

$$L(R) = \frac{(l \max_1 + l \max_2 + l \max_3) + (l \min_1 + l \min_2 + l \min_3)}{n} \quad (2.8)$$

Donde:

$L(R)$: Lectura en la regla visual de marea para una hora determinada

$l \max(1.2.3)$: Lecturas de los valores máximos de la marea para una hora determinada

$l \min(1.2.3)$: Lecturas de los valores mínimos de la marea para una hora determinada

n : Cantidad de lecturas en la regla visual de marea.

Contando con el resultado de las observaciones en campo se realiza el procesamiento de la marea. Para ello, con ayuda del software Microsoft Office Excel 2007, se elabora un mareograma donde se realiza el registro de la marea y el procesamiento de las observaciones.

Se identifican las alturas de marea correspondientes a la hora de observación (anexo 7) en un gráfico de curva en el cual se representa en el eje de las X el horario y en el eje de la Y la lectura en la regla, este expresa los valores de la pleamar más alta y la bajamar más baja, referido al plano de referencia establecido anteriormente como cero del puesto. Esto permite determinar el nivel medio del mar de la zona de estudio como resultado del promedio de la pleamar

más alta y la bajamar más baja, aplicando la ecuación 2.9 a todas las reglas en cada ciclo (Batista, 2012).

$$NMM = \frac{P_{\max} + B_{\min}}{2} \quad (2.9)$$

Donde:

NMM : Nivel medio de mar

P_{\max} : Valor máximo de pleamar

B_{\min} : Valor mínimo de bajamar.

El resultado de esta ecuación revela el valor de lectura en la regla visual de marea coincidente con el nivel medio del mar, considerado cero para la determinación de alturas de puntos sobre la superficie del terreno.

Conociendo la lectura en la regla coincidente con el nivel medio del mar en la zona de estudio se puede determinar la altura del punto de origen del modelo del geoide. Para darle cumplimiento a esta tarea se emplea el método de densificación altimétrica llamado nivelación geométrica.

En cada ciclo se mide un circuito de nivelación geométrica cerrada, partiendo de cada una de las reglas que conforman la estación mareográfica temporal, tocando el punto de origen del modelo y cerrando en la misma estación (Batista, 2012).

Se debe cumplir con lo establecido en las instrucciones técnicas para la nivelación del año 1987.

1. El error de cierre de la nivelación no debe exceder los $\pm 50\sqrt{L}$, L , longitud de la línea de nivelación en km.
2. Distancia máxima del instrumento a la mira 150 m.
3. Distancia máxima de una sección 300 m.

4. Realizar dos puestas en cada sección.
5. La diferencia entre los desniveles de una misma sección no pueden ser mayores de 5 mm.

En la sección medida desde la estación temporal de marea y la superficie del terreno se tiene en cuenta el resultado de la diferencia entre la lectura en la regla de marea que representa el nivel medio del mar y la superficie de referencia establecida como cero del puesto (Batista, 2012), ya que la mira está referenciada al cero del puesto y lo que se necesita es el desnivel referido al NMM, por lo tanto se le aplica a la mira de espalda una corrección (ecuación 2.10).

$$ME_c = L_{ME} - (L_{RNMM} - C_p) \quad (2.10)$$

Donde:

ME_c : Corrección en la mira de espalda

L_{ME} : Lectura en la mira de espalda

L_{RNMM} : Lectura en la regla que representa el nivel medio del mar

C_p : Cero del puesto.

Una vez determinada la corrección en la mira de espalda, se calcula el desnivel entre los puntos empleando la ecuación 2.11,

$$\Delta Z = ME - MF \quad (2.11)$$

Donde:

ΔZ : Diferencia de nivel entre dos puntos

ME : Mira de espalda

MF : Mira de frente.

Los resultados de la observación en campo se registran en la memoria interna del instrumento utilizado y en gabinete se descargan a una computadora a través del software Leica Geoffice, donde posteriormente se realiza el ajuste de la línea de nivelación (anexo 8). Este proceso se realiza para todas las reglas y en cada ciclo de observación. Para obtener la altura definitiva del punto de origen del modelo, se calcula el promedio de las alturas de cada ciclo obtenidas por el estudio del NMM en la región (anexo 9).

2.6.1.1. Determinación de incertidumbre de medición por el método de simulación Monte Carlo.

Como el péndulo simple es construido para la investigación es necesario determinar su incertidumbre de medición, para ello se utiliza el método de simulación Monte Carlo.

La clave de la simulación Monte Carlo consiste en crear un modelo matemático del sistema, proceso o actividad que se quiere analizar, identificando aquellas variables inputs del modelo, cuyo comportamiento aleatorio determina el comportamiento global del sistema (Wolfgang, 2004). Una vez identificados dichos inputs o variables aleatorias se lleva a cabo un experimento consistente en:

1. Generar con ayuda del ordenador muestras aleatorias, valores concretos para dichos inputs.
2. Analizar el comportamiento del sistema ante los valores generados.

Tras repetir n veces este experimento se dispone de una serie de observaciones sobre el comportamiento del sistema, lo cual será de utilidad para entender el

funcionamiento del mismo; el análisis será tanto más preciso cuanto mayor sea el número n de experimentos que se lleven a cabo (Wolfgang, 2004).

El algoritmo de simulación Monte Carlo está fundamentado en la generación de números aleatorios por el método de transformación inversa, el cual se basa sobre las distribuciones acumuladas de frecuencias (tabla 2.3).

Tabla 2.3. Distribuciones acumuladas de frecuencia

Distribuciones acumuladas de frecuencia		
Distribución	Parámetros	Fórmula Excel
Exponencial	Media = b	$= -\text{Ln}(\text{ALEATORIO()}) * b$
Weibull	Escala = b Forma = a	$= b * (-\text{LN}(\text{ALEATORIO()}))^{(1/a)}$
Normal	Media = μ Desv. estándar = σ	$= \text{DISTR.NOM.INV}(\text{ALEATORIO()}, \mu, \sigma)$
Lognormal	Media de $\text{Ln}(X) = \mu$ Desv. Estándar de $\text{Ln}(X) = \sigma$	$= \text{DISTR.LOG.INV}(\text{ALEATORIO()}, \mu, \sigma)$
Uniforme entre a y b	Extremo inferior = a Extremo superior = b	$= a + b(b - a) * \text{ALEATORIO()}$

Algoritmo del método de simulación Monte Carlo

1. Establecimiento del modelo matemático.
2. Identificación de las fuentes y componentes de incertidumbre.
3. Determinar las variables aleatorias y sus distribuciones acumuladas (F).
4. Generar un número aleatorio distribuido uniformemente entre 0 y 1.
5. Determinar el valor de las variables aleatorias para el número aleatorio generado de acuerdo con las clases.
6. Calcular media, desviación estándar.
7. Analizar resultados para distintos tamaños de muestra.

Establecimiento del modelo matemático

Representa la dependencia entre el mensurando Y y el valor estimado de cada magnitud de entrada X_i en el proceso de medición (ecuación 2.12).

$$Y = F(X_1, X_2, X_3) \quad (2.12)$$

Donde:

$X_1 = (u_1)$: Componente debido a la dispersión de las observaciones

$X_2 = (u_2)$: Componente debido al error del instrumento de medición

$X_3 = (u_3)$: Componente debido a la apreciación del observador.

Identificación de las fuentes de incertidumbre

- Variación de las observaciones repetidas.
- Error del instrumento de medición.
- Error de apreciación del observador 0,05 mm.

Componente debido a la dispersión de las observaciones

Se tiene en cuenta la desviación estándar del resultado de las observaciones repetidas en cada punto con el péndulo, donde influyen variables aleatorias que se determinan mediante la ecuación 2.13.

$$u_1 = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2.13)$$

Donde:

u_1 : Componente de dispersión de las observaciones

S : La desviación estándar de las repeticiones en las mediciones de gravedad

n : Cantidad de repeticiones.

Para la realización del cálculo se utiliza el software Microsoft Office Excel; se identifica como variable aleatoria la aceleración de gravedad. Se conoce por información empírica que los datos generados en mediciones repetidas se ajustan a una distribución normal, por tanto, se utiliza la distribución acumulada de frecuencia (ecuación 2.14).

$$f(x) = DISTR.NORM.INV(ALEATORIO(), \mu, \sigma) \quad (2.14)$$

Donde:

μ : Media

σ : Desviación estándar.

Los valores de la media y desviación estándar se calculan a partir de las (ecuaciones 2.15 y 2.16).

$$\mu = \frac{\sum g}{n} \quad (2.15)$$

Donde:

μ : Valor de la media en las observaciones de aceleración de gravedad

g : Aceleración de la gravedad medida

n : Cantidad de mediciones.

$$\sigma = \frac{\sum \delta g^2}{n-1} \quad (2.16)$$

Donde:

σ : Valor de la desviación estándar

δg^2 : Cuadrado de las desviaciones de la media con cada valor medido

n : Cantidad de mediciones.

Posteriormente en el software Microsoft Office Excel 2007, se generan números aleatorios (figura 2.4).

	A	B	C
1	Números :		Distribución :
2	0,85518033	=ale	976566,467
3	0,42939841		
4	0,20215278		
5	0,18683537		976566,371
6	0,68247364		976566,438
7	0,9330118		976566,488
8	0,46756005		976566,411

Figura 2.4. Generación de números aleatorios.

Conociendo la media y desviación estándar y aplicando la ecuación 2.14 se determina el valor de la variable aleatoria para el número aleatorio generado (figura 2.5), con el cual se calcula la media y el valor de la desviación estándar en las repeticiones de las medidas de gravedad (S); posteriormente se calcula el valor de u_1 .

	A	B	C	D	E
1	Números		Distribución de frecuencia		
2	0,36524759		976566,398		
3	0,72569214		976566,444		
4	0,78600411		976566,454		
5	0,83021086		976566,462		
6	0,41176227		976566,404		
7	0,99041704		976566,53		
8	0,41283693		976566,404		
9	0,46756005		976566,411		

Figura 2.5. Cálculo de la variable aleatoria.

Componente debido al error del instrumento de medición

Se toma el valor máximo del error del instrumento y se aplica una distribución rectangular (ecuación 2.17).

$$u_2 = \frac{Em}{\sqrt{3}} \quad (2.17)$$

Donde:

u_2 : Componente debido al error del instrumento de medición

Em : Error máximo del instrumento 2 mm.

Componente debido a la apreciación del observador

Se calcula por la ecuación 2.18.

$$u_3 = \frac{\partial d}{\sqrt{12}} \quad (2.18)$$

Donde:

u_3 : Componente de apreciación del observador

∂d : Error debido a la apreciación del observador: 5 mm.

Cálculo de la incertidumbre combinada

En la ecuación 2.19 se aplica la ley de propagación cuadrática de incertidumbre a la ecuación modelo:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n u^2(x)_i} \quad (2.19)$$

Donde:

u_c : Incertidumbre combinada

u : Componentes de incertidumbres.

Cálculo de la incertidumbre expandida

Se aplica la ecuación 2.20, para obtener el valor de la incertidumbre expandida.

$$U = K \times u_c \quad (2.20)$$

Donde:

U : Incertidumbre expandida

K : Factor de cobertura 2

u_c : Incertidumbre combinada.

2.6.2. Trabajos de gabinete

Para procesar las informaciones obtenidas en los trabajos de campo se desarrollan los pasos siguientes:

- Identificación de las tolerancias admisibles.
- Generación de modelos digitales de superficie 3D.
- Determinación del modelo de ondulaciones del geoide a partir del análisis geoespacial de planos en plataforma SIG.

Identificación de las tolerancias admisibles

Se realiza un estudio de las normas, instrucciones y procedimientos vigentes en los trabajos mineros de la región de estudio, con el objetivo de seleccionar las tolerancias admisibles mínimas en coordenadas espaciales que deben cumplir los diferentes trabajos. Se realiza un estudio detallado con el objetivo de ampliar el campo de empleo de la tecnología GPS en los diferentes trabajos que se relacionan en el alcance del procedimiento.

Generación de modelos digitales de superficie 3D

Para generar los modelos digitales de superficie 3D se utiliza el software Autocad Civil 3D, cumpliendo con el procedimiento descrito en su manual de usuarios.

Con las coordenadas de los puntos experimentales referenciado al sistema de alturas obtenido por el estudio del NMM, en la zona de los trabajos se genera un modelo digital del terreno. Los resultados de las mediciones de alturas elipsoidales permiten elaborar un modelo digital de alturas elipsoidales y con los resultados de las mediciones de aceleración de la gravedad se calculan las correcciones gravimétricas a la topografía, permitiendo generar un modelo digital

de correcciones gravimétricas, que se calcula mediante la ecuación 2.21 (Sánchez, 2010):

$$\delta g_{topo} = 2f \times g_{med} \frac{h^2}{r^3} \quad (2.21)$$

Donde:

δg_{topo} : Corrección a la topografía por gravedad

f : Constante gravitacional: $6.67 \times 10^{-11} kg^{-1}m^3S^{-2}$

g_{med} : Gravedad medida en la superficie del terreno

h^2 : Diferencia de altura entre el punto de origen y el punto a determinar

r^3 : Distancia entre el punto de origen del modelo y el punto a determinar.

Diseño del SIG

Para la creación del sistema de información geográfica se importan todos los modelos digitales creados en extensión shp al software ArGis, con el objetivo de realizar un análisis espacial analítico con operaciones matemáticas para obtener como resultado un nuevo modelo de ondulaciones del geoide. Se utiliza la herramienta ArcToolbox, del software ArGis, para realizar cálculos entre los modelos (figura 2.6). Las operaciones matemáticas a utilizar son la suma y resta, se cargan en la ventana de trabajo (figura 2.7) y se realiza el cálculo.

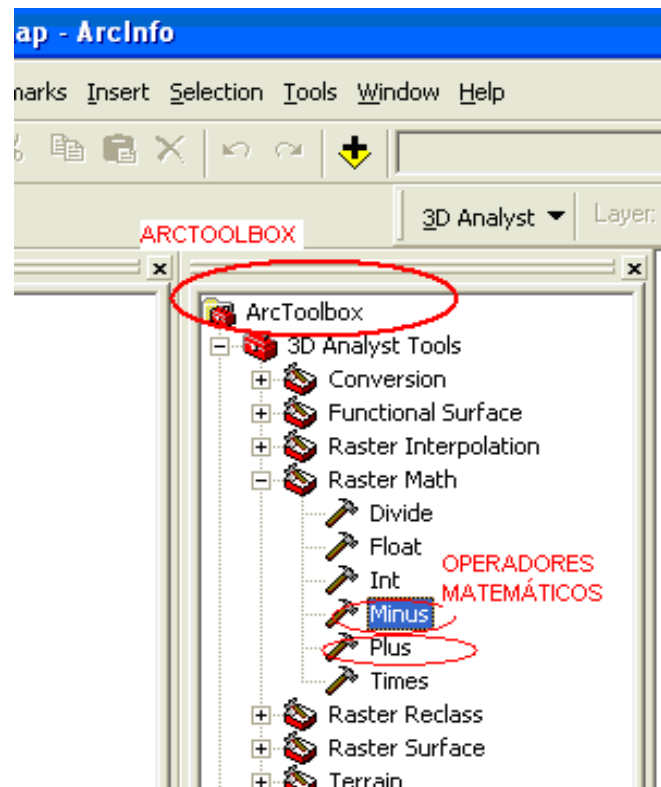


Figura 2.6. Módulo ArcTolbox de operadores matemáticos en software ArGis.

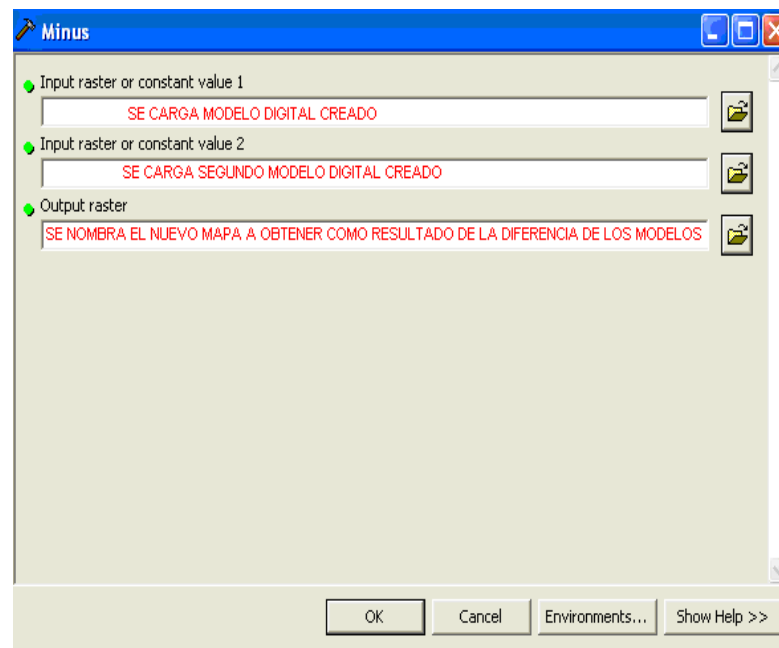


Figura 2.7. Ventana de cálculo del software ArGIS.

Para calcular el modelo de ondulaciones del geoide en el SIG se emplea la ecuación 2.22.

$$MOG = (MDAE + MDCG) - MDT \quad (2.22)$$

Donde:

MOG: Modelo de ondulaciones del geoide

MDAE: Modelo digital de alturas elipsoidales

MDCG: Modelo digital de correcciones gravimétricas

MDT: Modelo digital del terreno.

2.7. Conclusiones parciales:

1. El procedimiento para la modelación de coordenadas espaciales tiene en cuenta las características de la nueva tecnología de instrumentos topogeodésicos y su empleo en los yacimientos de la región minera de Moa, lo cual permite realizar el estudio de las coordenadas espaciales para determinar los parámetros técnicos de medición y ampliar el campo de empleo de las estaciones totales y GPS, garantizando la productividad y eficiencia en los servicios topográficos mineros.
2. Se propone una forma novedosa para determinar el modelo de ondulaciones del geoide, resultado de la fusión de dos métodos conocidos, así como la determinación de nuevos parámetros de medición que permitan utilizar la nueva tecnología de instrumentos topogeodésicos de acuerdo a la productividad para lo cual ha sido diseñada.

CAPÍTULO III

**VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE
COORDENADAS ESPACIALES**

CAPÍTULO III. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO PARA LA MODELACIÓN DE COORDENADAS ESPACIALES

3.1. Características físico-geográficas del área de estudio (caso de estudio)

La zona de estudio se encuentra ubicada en el municipio de Moa, en la parte más nororiental de la provincia de Holguín (figura 3.1); forma parte del grupo orográfico Sagua Baracoa, lo cual hace que el relieve sea predominantemente montañoso, principalmente hacia el sur. En el norte el relieve se hace más suave, disminuyendo gradualmente en la costa.

La vegetación se caracteriza por la existencia de bosques de Pinus cubensis en las cortezas lateríticas y donde hay menores potencias de las mismas, matorrales espinosos, típicos de las rocas ultramáficas serpentinizadas. Las zonas bajas litorales están cubiertas por una vegetación costera típica entre la que se destacan los mangles (Rodríguez, 1998).

La red fluvial de interés está representada por los ríos Moa, Cayo Guam y Punta Gorda, el embalse Nuevo Mundo y la micropresa derivadora de Moa. La fuente de alimentación principal de la red hidrográfica son las precipitaciones atmosféricas, que desembocan en las arterias principales en el océano Atlántico y forman deltas cubiertos de sedimentos palustres (Almaguer, 2005).

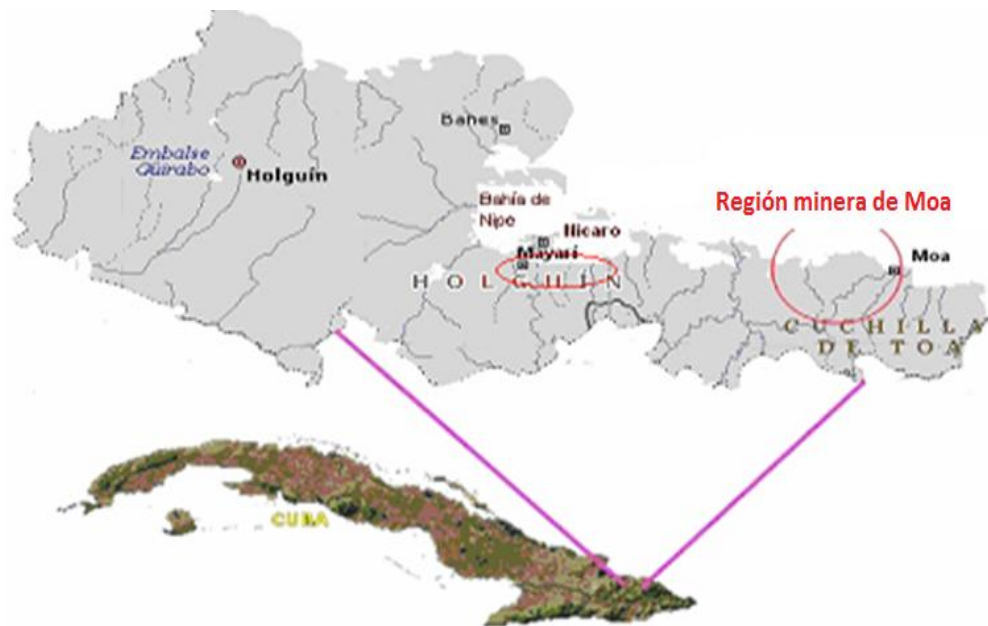


Figura 3.1. Ubicación geográfica de la región niquelífera.

Las áreas para la validación del procedimiento se encuentran ubicadas dentro del límite de las coordenadas planas rectangulares aproximadas: $x=696\,000,00\text{ m}$ y $703\,000,00\text{ m}$; $y=215\,000,00\text{ m}$ y $225\,000,00\text{ m}$. En estas zonas se identificaron los puntos experimentales que se muestran a continuación:

- La densificación geodésica planimétrica y altimétrica utilizada en las mediciones experimentales con estaciones totales fue construida por el grupo empresarial del MINFAR (Geocuba) en el año 2010, estableciendo en la mina de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba cuatro puntos de centración forzada denominados FNC-2, FNC-3, FNC-4 y FNC-5, para una precisión de cuarto orden en coordenadas planimétricas y un segundo orden en altimetría.
- Puntos topográficos de la red geodésica de apoyo para la presa de colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, un total de 91 puntos

de primera categoría, creados en trabajos de densificación, ejecutados por el método de levantamiento directo con estaciones totales por la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel (CEPRONIQUEL).

- Se recopilieron datos de cuatro puntos de primer orden, pertenecientes a la línea geodinámica de Los Indios a Santa María, con coordenadas altimétricas y valores de aceleración de la gravedad (tabla 3.1), los mismos se encuentran en los límites de la zona a estudiar.

Tabla 3.1. Puntos de la red de primer orden de la línea geodinámica

Punto	Altura (m)	Aceleración de la gravedad (miligal)
PR-1	4,076	976366,457
PR-2	3,451	976566,388
PR-3	3,628	970168,574
5277-55-A	11,604	982071,3002

Además, se cuenta con un levantamiento topográfico a escala 1:500, realizado por la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel con estaciones totales.

3.2. Trabajos de campo con las estaciones totales

Primero se realizó un inventario sobre el tipo de estaciones totales que se utilizan en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa, donde se pudo observar la presencia de estaciones totales Sokkia y Leica de diferentes series. Como conclusión, para realizar la experimentación se decide utilizar la Leica TCR 805, con un error medio cuadrático en la determinación del ángulo de cinco segundos y un error en la medición lineal de 3 mm+2 ppm, seleccionada bajo el criterio de ser la menos precisa que se emplea en la región minera de Moa.

Para llevar a cabo la experimentación se seleccionó el polígono de puntos de centración forzada en la mina de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba. Los

puntos y combinaciones de mediciones del experimento se relacionan en el anexo 10.

Se midieron coordenadas y distancias entre puntos seleccionados, reiteradas, estacionados en diferentes posiciones, utilizando el método de todas las combinaciones posibles. Para conocer la cantidad de experimentos que se necesitan para obtener los resultados esperados fue necesario diseñar experimentos, utilizando el método plan factorial (Hernández *et al.*, 2007), fundamentado en la expresión 2^n , donde n es la cantidad de variables que intervienen en el experimento.

En este caso para distancias menores a 350 m no influye el error por curvatura y refracción terrestre e intervienen dos variables no controladas, es decir, no reguladas en condiciones de laboratorio; en distancias mayores entonces inciden tres variables (tabla 3.2).

Tabla 3.2: Variables que inciden en los experimentos

Variables que intervienen en distancias menores a 350 m	Variables que intervienen en distancias mayores a 350 m
Temperatura	Temperatura
Velocidad del viento	Velocidad del viento
.....	Curvatura y refracción

Si se desarrolla la expresión anterior para los dos casos:

$$2^2 = 4$$

$$2^3 = 8$$

Se obtiene como resultado que deben realizarse cuatro experimentos en distancias menores a 350 m y ocho para distancias mayores. La cantidad de series de observaciones a realizar en cada experimento se calculó empleando la ecuación 2.1. Los resultados se muestran en el anexo 11.

Las mediciones se ejecutaron en cuatro ciclos durante un año, tratando de buscar las condiciones ambientales más extremas en las minas.

3.3. Trabajos de gabinete para la determinación de parámetros técnicos aplicados a las estaciones totales

Fue necesario realizar un análisis de los parámetros técnicos establecidos por las instrucciones técnicas para levantamientos topográficos a escala 1: 2 000, 1: 1000 y 1: 500 del año 1987, para los métodos de densificación planimétricos y altimétricos, así como para los levantamientos topográficos.

Se estudiaron los errores máximos alcanzados en las mediciones experimentales con las estaciones totales, sometiéndose a una comparación con las tolerancias admisibles para coordenadas espaciales calculadas según norma, lo cual permitió determinar los parámetros técnicos de medición para esta tecnología, a partir de la modelación de coordenadas espaciales.

3.3.1. Análisis de las tolerancias admisibles para la densificación de redes

Para obtener las tolerancias admisibles en coordenadas espaciales en los métodos de densificación, primeramente se analizan los permisibles para la planimetría, se realiza un análisis de lo establecido por las instrucciones técnicas para levantamientos a escalas 1: 2 000, 1: 1 000 y 1: 500 del Ministerio de la Construcción (tabla1 del anexo 2). Se observa que existen errores permisibles que no fueron determinados debido a la presencia de solo mediciones angulares y lineales en determinado orden de precisión que no era necesario tener en cuenta. Al incorporar los parámetros para las coordenadas altimétricas es necesario calcularlos considerando la relación entre precisión lineal y precisión angular. Esta relación se obtiene aplicando las ecuaciones 3.1 y 3.2 (anexo 12).

$$\frac{P_1}{emc_1} = \frac{P_2}{emc_2} \quad (3.1)$$

Donde:

P_1 : Precisión lineal de la poligonal de cuarto orden

emc_1 : Error medio cuadrático de la medición del ángulo de la poligonal de cuarto orden

P_2 : Precisión lineal de la poligonal de primera categoría

emc_2 : Error medio cuadrático de la medición del ángulo de la poligonal de primera categoría.

$$\frac{emc_1}{eca_1} = \frac{emc_2}{eca_2} \quad (3.2)$$

Donde:

emc_1 : Error medio cuadrático de la medición del ángulo de la poligonal de cuarto orden

eca_1 : Error de cierre angular de la poligonal de cuarto orden

emc_2 : Error medio cuadrático de la medición del ángulo de la poligonal de primera categoría

eca_2 : Error de cierre angular de la poligonal de primera categoría.

Para determinar las longitudes máximas de las poligonales que no fueron calculadas en las normas se aplica la ecuación 3.3 (Ganshin y Koskov, 1977; Belete y Batista, 2012), como se muestra en el anexo 12.

$$L = 1.73MT_m \quad (3.3)$$

Donde:

L : Longitud máxima de la poligonal

M : Error estándar (Ganshin & Koskov, 1977), $M=0,43$ mm)

T_m : Denominador del error relativo permisible de la poligonal.

En la tabla 3.3 se muestra el completamiento de los parámetros no tenidos en cuenta en la instrucción técnica para levantamientos topográficos a escalas 1:2000, 1:1000 y 1:500.

Tabla 3.3. Completamiento de los parámetros técnicos poligonométricos

Características	4to orden	I categoría	II categoría	I clase	II clase
Error relativo	1:25000	1:10000	1.5000	1:2000	1:1000
Error medio cuadrático en la medición de ángulos	2"	5"	10"	25"	50"
Error de cierre angular	$5''\sqrt{n}$	$10''\sqrt{n}$	$20''\sqrt{n}$	$50''\sqrt{n}$	$100''\sqrt{n}$
Longitud límite, km	10	5	3	1,5	0,7

En la altimetría se analiza lo establecido en la tabla 2 del anexo 2, donde se muestran los errores de cierres según el orden de precisión. En los trabajos de la topografía minera se utilizan el cuarto orden y la nivelación técnica.

3.3.2. Determinación de las tolerancias admisibles por normas en coordenadas espaciales para poligonales

Se realizó un cálculo de los errores máximos permisibles para cada distancia patrón propuestas en los experimentos, teniendo en cuenta las tolerancias contenidas en las tablas 1 y 2 del anexo 2, para la posición planimétrica y altimétrica, respectivamente. Las tablas 3.4 y 3.5 muestran los resultados obtenidos.

Para realizar los cálculos en la determinación de los errores admisibles en la planimetría se utilizó la ecuación 3.4.

$$\frac{1}{P} \times D_p \quad (3.4)$$

Donde:

P : Precisión lineal

D_p : Distancia patrón.

Tabla 3.4. Errores admisibles en planimetría

Distancias (m)	IV Orden (m)	I Categoría (m)	II Categoría (m)	I Clase (m)	II Clase (m)
Para 100	0,004	0,010	0,020	0,050	0,100
Para 500	0,020	0,050	0,100	0,250	0,500
Para 1000	0,040	0,100	0,200	0,500	1,000
Para 1200	0,048	0,120	0,240	0,600	1,200
Para 1500	0,06	0,150	0,300	0,750	1,500

En los cálculos para la determinación de los errores admisibles en la altimetría se utilizaron las ecuaciones 3.5 y 3.6 para el cuarto orden de precisión y la nivelación técnica, respectivamente.

$$\text{IV orden} \quad F_n \pm 20\sqrt{L} \quad (3.5)$$

$$\text{Técnica} \quad F_n \pm 50\sqrt{L} \quad (3.6)$$

Donde:

L : Longitud de la línea en km

F_n : Error de cierre de la línea de nivelación.

Tabla 3.5. Errores admisibles en altimetría

Distancias (m)	IV Orden (m)	I y II Categoría y Clase (m)
< 100	0,006	0,016
100- 500	0,014	0,035
500-1 000	0,020	0,050
1 000-1 200	0,022	0,054
1 200-1 500	0,024	0,061

Para obtener los errores máximos permisibles en la determinación de coordenadas espaciales fue necesario combinar las tolerancias en los planos horizontales y verticales. Se calculó considerando la suma de las fuentes de errores, según Olivera (2010), a partir de la ecuación 3.7. En la tabla 3.6 se muestran los resultados.

$$m_{TC} = \sqrt{m_{planim}^2 + m_{alt}^2} \quad (3.7)$$

Donde:

m_{TC} : Errores totales en la determinación de un punto con coordenadas espaciales

m_{planim} : Errores en la determinación de la planimetría

m_{alt} : Errores en la determinación de las alturas.

Tabla 3.6. Errores totales en la determinación de las coordenadas espaciales para poligonales

Distancias (m)	IV Orden (m)	I Categoría (m)	II Categoría (m)	I Clase (m)	II Clase (m)
< 100	0,007	0,019	0,026	0,052	0,101
100- 500	0,024	0,061	0,105	0,252	0,501
500-1 000	0,045	0,112	0,206	0,502	1,001
1 000-1 200	0,053	0,132	0,246	0,602	1,201
1 200-1 500	0,065	0,162	0,306	0,752	1,501

3.3.3. Determinación de tolerancias admisibles por normas en coordenadas espaciales para levantamientos topográficos

En el cálculo se consideraron los requisitos contenidos en las instrucciones técnicas para los levantamientos topográficos a las escalas 1: 2 000, 1: 1 000 y 1:500, editada por el Ministerio de la Construcción en el año 1987 (tabla 3 del anexo 2). La fusión de las tolerancias admisibles en coordenadas espaciales se realizó utilizando la ecuación 3.7. Los resultados se muestran en la tabla 3.7.

Tabla 3.7. Tolerancias admisibles para la determinación de coordenadas espaciales en levantamientos topográficos

Escala	De importancia espaciales (m)	En zonas llanas espaciales (m)	En zonas montañosas espaciales (m)
1:500	0,26	0,30	0,39
1: 1 000	0,52	0,60	0,77
1: 2 000	1,04	1,20	1,55

3.4. Análisis de los resultados de las mediciones experimentales con estaciones totales

En la tabla 3.8 se muestran los resultados obtenidos en las mediciones experimentales realizadas con las estaciones totales en el polígono de puntos de centración forzada de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba, donde se interrelacionan las desviaciones en la medición de distancias, coordenadas y alturas de los puntos, mostrando las máximas diferencias referenciadas a cada punto patrón.

Tabla 3.8. Resultados de las mediciones experimentales

Distancias patrones (m)	Desviaciones en cotas (mm)	Desviaciones en coordenadas (mm)	Desviaciones en distancias (mm)
< 100	4	2	1
100- 500	18	8	3
500-1 000	44	11	5
1 000-1 200	53	13	8
1 200-1 500	68	16	10

El error total de las mediciones experimentales para cada distancia patrón se obtuvo empleando la ecuación 3.8 (Olivera, 2010), donde se interrelacionan las tres fuentes de error en la determinación de las coordenadas espaciales. Los resultados se muestran en la tabla 3.9.

$$m_{TC} = \sqrt{m^2_{dist} + m^2_{alt} + m^2_{coord}} \quad (3.8)$$

Donde:

m_{TC} : Errores totales en la determinación de un punto con coordenadas espaciales.

m_{dist} : Errores en la determinación de las distancias

m_{alt} : Errores en la determinación de las alturas

m_{coord} : Errores en la determinación de las coordenadas.

Tabla 3.9. Error total en la determinación de las coordenadas espaciales en los experimentos

Distancias (m)	Errores obtenidos coordenadas espaciales (m)
100	0,004
500	0,020
1000	0,046
1200	0,055
1500	0,070

3.4.1. Análisis comparativo de los errores obtenidos en las mediciones experimentales y los establecidos por las normas

En el anexo 4 (figura 1), se reflejan los resultados de los errores reales obtenidos en el experimento para poligonales, llevados a una gráfica en forma de línea apilada. Se comparan con los errores permisibles según las instrucciones para las poligonales, teniendo en cuenta los órdenes de precisión establecidos. En el gráfico se puede apreciar que las poligonales de cuarto orden, cuando se miden distancias mayores a 800 m, las mediciones están fuera del permisible. Se puede observar que las mayores exactitudes obtenidas en este orden se encuentran en las distancias entre 200 y 400 m, tomando el máximo valor a los 350 m. En los demás órdenes de precisión se puede identificar que las mediciones experimentales con las estaciones totales están por debajo de las normas, alcanzando su máxima exactitud en distancias medidas hasta los 900 m.

En el gráfico del anexo 4 (figura 2), se puede observar que todas las mediciones experimentales están por debajo de la norma establecida para la determinación

de piquetes de levantamiento topográfico; notándose que en todas las escalas, a distancias mayores a los 1 000 m, se encuentran las mayores dispersiones.

3.4.2. Parámetros técnicos modelados para coordenadas espaciales

A partir de los resultados de los experimentos realizados se proponen los parámetros técnicos de medición para la poligonometría y levantamientos con las estaciones totales (tablas 3.10 y 3.11).

Tabla 3.10. Parámetros técnicos para las poligonales planoaltimétricas en yacimientos lateríticos en la región minera de Moa

Características	IV Orden	I Categoría	II Categoría	I Clase	II Clase
Longitud de los lados de la poligonal en km	0,350	0,900	0,900	0,900	0,900

Tabla 3.11. Parámetros técnicos para los levantamientos topográficos con estaciones totales para piquetes del levantamiento

Escala	Distancia máxima (m)
1:500	1 000
1: 1 000	1 000
1: 2 000	1 000

3.5. Validación de los parámetros técnicos determinados para la poligonometría

Cumpliendo con los parámetros técnicos determinados en la investigación se realizó una validación a un total de 10 poligonales distribuidas por los yacimientos lateríticos de las empresas de níquel: Comandante Ernesto Che Guevara y

Comandante Pedro Sotto Alba. En las tablas 1 y 2 del anexo 13 se pueden observar los cierres planimétricos y altimétricos de las poligonales. La poligonometría fue ejecutada por brigadas de topografía minera de la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel y de ambas fábricas de níquel en operaciones radicadas en la región de Moa.

En ambos casos se puede observar que las exactitudes obtenidas en las poligonales medidas cumplen con las tolerancias admisibles. Para comprobar la precisión se aplica la ecuación 3,9. Se pudo confirmar que con la utilización de los parámetros de la investigación, se obtienen exactitudes en las mediciones superiores a 1,4 veces las exigencias técnicas establecidas. En la tabla 3.12 se muestran los resultados del análisis realizado, considerando la teoría de elaboración matemática de las mediciones geodésicas, la cual plantea que las tolerancias máximas a establecer para un permisible oscilan desde un mínimo de 1,0 hasta un máximo de 2,0 veces el error obtenido, si supera el mayor valor se diluye precisión. Como resultado se demuestra que cuando se mide con estaciones totales en las condiciones de las minas no es preciso realizar poligonales de segunda clase. En la tabla 2.1 se muestran las tolerancias admisibles para los trabajos de la topografía minera en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa, resultado de esta investigación, para la determinación de puntos de apoyo con coordenadas espaciales. Se puede apreciar la diferencia en relación a la tabla 3.6 por la sustitución de los órdenes de precisión llamados clases, por un orden al cual se denomina como poligonal técnica.

$$VI_{Orden} = \frac{E_{obt}}{E_{perm}} \quad (3.9)$$

Donde:

VI_{Orden} . Valor de exactitud en las mediciones para un IV orden

E_{obt} : Error relativo obtenido en las poligonales

E_{perm} : Error relativo admisible.

Tabla 3.12. Exactitud en las mediciones

IV Orden	I Categoría	II Categoría	I Clase	II Clase
1,6	1,4	1,4	2	5

3.5.1. Validación de los parámetros técnicos determinados para levantamientos topográficos

Se realizaron dos levantamientos topográficos: uno en el yacimiento Punta Gorda de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, a escala 1:500, y otro a escala 1:1 000 en el yacimiento Camarioca Sur de la empresa Comandante Pedro Sotto Alba, en ambos casos se estacionó el instrumento de forma tal que permitiera realizar observaciones hasta 1 000 m.

Con los resultados de campo se generaron los modelos digitales del terreno, fueron calculadas las desviaciones respecto a levantamientos patrones del área, realizados con estaciones totales y niveles por la empresa Geocuba Oriente Sur, durante los trabajos de exploración geológicas. La tabla 3.13 muestra la comparación de los resultados obtenidos respecto a las tolerancias admisibles.

Como se puede observar en ambos levantamientos se obtuvieron valores de desviaciones por debajo de tolerancias admisibles, quedando validados los parámetros para los levantamientos topográficos.

Tabla 3.13. Principales desviaciones entre los levantamientos a validar

Yacimiento	Valor mínimo de las desviaciones (m)	Valor máximo de las desviaciones (m)	Tolerancias admisibles (m)
Punta Gorda Escala 1:500	0,06	0,11	0,26
Camarioca Sur Escala 1:1000	0,09	0,18	0,52

3.6. Selección del método para la determinación del modelo de ondulaciones del geoide

Con el objetivo de conocer la exactitud que se necesita para la determinación del modelo de ondulaciones del geoide, se consultaron las normas cubanas (RC3008, RC3011, RC3013, RC 3016), aplicadas en los trabajos topográficos en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa. Las tolerancias admisibles mínimas identificadas en las normas son las siguientes:

- a) Niveles de la superficie ± 10 cm
- b) Alineación ± 20 cm
- c) Pie de talud + 50 cm

Teniendo en cuenta la tolerancia altimétrica por norma de ± 10 cm y los resultados de la investigación en los departamentos de topografía en la zona de estudio, donde se plantea que las desviaciones en las altura de puntos cuando se utiliza la tecnología GPS, son mayores a 20 cm; se justifica la investigación del modelo de ondulaciones del geoide con precisiones menores a la establecida por la norma cubana.

Con el resultado de la revisión bibliográfica y la información de trabajos anteriores, tanto a nivel nacional e internacional y conociendo las particularidades

de los métodos existentes para determinar el modelo del geoide, se decidió realizar una fusión del método geométrico y el físico (Batista, 2012). Al resultado de esta fusión se le llamó método combinado.

En el desarrollo del método combinado fue necesario realizar investigaciones en campo, para determinar las alturas elipsoidales, realizar mediciones de aceleración de la gravedad y obtener la elevación del punto inicial del modelo, utilizando los equipos de medición que se muestran en la figura 3.2.

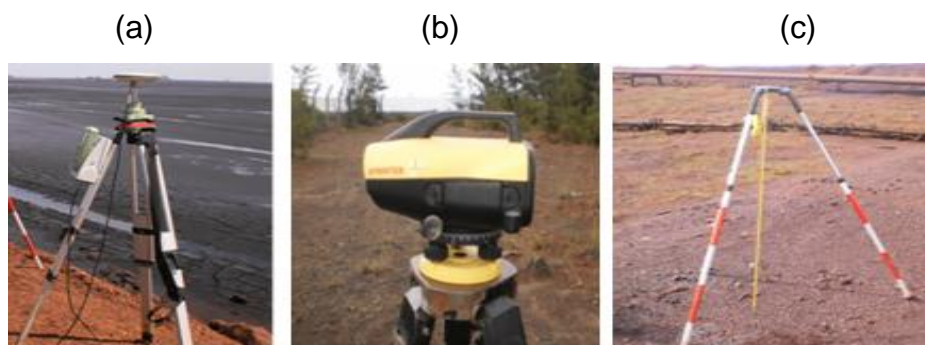


Figura 3.2. a) Receptor GPS b) Nivel Sprinter 200 c) Péndulo simple.

- a) Receptor GPS: instrumento de medición de la marca Leica 1200, encargado de recibir las señales de la constelación de satélites en órbita, con el fin de calcular las posiciones de puntos, en el plano, el espacio o sobre cualquier superficie de referencia. Se conoce la incertidumbre de medición suministrada por el fabricante, en este caso $5 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$, siempre se verifican los receptores antes de comenzar los trabajos. En la investigación se utilizaron dos receptores en el modo estático diferencial.
- b) Nivel sprinter 200: instrumento de medición, que se utiliza en la determinación de coordenadas altimétricas de puntos en el terreno a partir del método de densificación llamado nivelación geométrica. Cuenta con el certificado de calibración, emitido por el taller metrológico No 57 de la

empresa Geocuba Oriente Norte, donde refleja que el instrumento se encuentra apto para el uso, con un valor de incertidumbre de ($\pm 0,8$ mm).

- c) Péndulo simple: este instrumento fue construido para la investigación, con el objetivo de realizar las mediciones para obtener valores de aceleración de la gravedad en puntos medidos. No se conoce ningún valor de incertidumbre, por lo que fue necesaria su determinación.

3.7. Determinación de la incertidumbre de medición del péndulo simple

Se consultaron los métodos para la determinación de las incertidumbres de medición que se utilizan en los laboratorios metrológicos. Como resultado se pudo comprobar que todos se fundamentan en la GUM, las incertidumbres son administradas por diferentes fuentes como informe de calibración y certificado del fabricante, donde las verificaciones se realizan en condiciones de laboratorios, con las variables controladas.

Al construir el instrumento no se cuenta con certificado del fabricante o informe de calibración, por lo que fue necesario recurrir a un método que pudiera identificar la desviación de una variable en condiciones ambientales de las minas; por sus características se seleccionó el método de simulación Monte Carlo (MCM). La aplicación del método se realizó según lo contenido en el epígrafe 2.6.1.1.

Como datos de partida para la determinación de la incertidumbre de medición se conoce que el valor de división de la cinta métrica es de 1 mm, el valor máximo de apreciación del cronómetro es de 0,01 s. La tolerancia en la determinación de los valores de aceleración de la gravedad, según las normas para estaciones de

la red nacional gravimétrica, es de 0,10 m. Como variable incógnita se identifica la aceleración de la gravedad medida con el instrumento en puntos conocidos.

En la tabla 3.14 se muestra el resultado final de la determinación de la incertidumbre de medición por el método de simulación Monte Carlo. Se realizó una comparación con el valor de incertidumbre permitido en la determinación de la aceleración de gravedad en puntos de la red gravimétrica nacional, referido a la red internacional con un valor de 0,10 m; se obtuvo como resultado que la incertidumbre del péndulo es tres veces menor que la tolerancia permitida (ecuación 3.10). Se considera el instrumento apto para realizar los trabajos.

Tabla 3.14. Incertidumbres de medición calculadas

Método	u₁ (m)	u₂ (m)	u₃ (m)	u_c (m)	U (m)
Monte Carlo	0,15909	0,00115	0,0144	0,01602	0,03210

$$\frac{T}{U} = \frac{0,10}{0,0321} = 3,11 \quad (3.10)$$

Donde:

T : Tolerancia admisible en la determinación de la aceleración de la gravedad en puntos sobre la superficie

U : Incertidumbre de medición del péndulo construido.

3.8. Trabajos de campo para la determinación del modelo de ondulaciones del geoide

Para darle cumplimiento a esta etapa se planificó el área que debe ocupar el modelo de ondulaciones del geoide en el terreno y se definió como punto de origen el monumento llamado Blet, el mismo se encuentra en la parte norte de la

presa de colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, próximo a la costa, buscando un área de mayor deformaciones en la figura de referencia. Partiendo del punto de origen del modelo se construyó una red de cuadrículas dentro de los límites definidos para el modelo de ondulaciones del geoide, con un espaciamiento tanto transversal como longitudinal de 200 m (anexo 14), donde se encuentran distribuidos, de forma homogénea, un total de 56 puntos experimentales seleccionados de la red existente en la presa de colas, que ocupan un área total de 448 ha del terreno.

3.8.1. Mediciones con los receptores GPS Leica 1200

El método de posicionamiento GPS utilizado en los trabajos de campo fue el estático diferencial, empleando dos receptores: uno en el punto de origen (Blet), como estación de referencia, y el móvil en las estaciones experimentales (figura 3.3).



Figura 3.3. Receptor GPS en punto experimental.

El inicio y terminación de las sesiones de trabajo fue planificado previamente, considerando la geometría de la constelación de satélites para cada día de medición. Los atributos de los puntos del proyecto, alturas de antena y los datos

meteorológicos al inicio y al finalizar la sesión fueron plasmados en la ficha de campo (anexo 5).

3.8.2. Mediciones de aceleración de la gravedad con el péndulo simple

En cada punto experimental se realizaron mediciones de aceleración de la gravedad cumpliendo con lo descrito en el epígrafe 2.6.1 de este trabajo. Antes de realizar los trabajos en cada jornada se comprobó el péndulo simple en dos estaciones de la línea geodinámica. Se diseñaron experimentos, utilizando el método plan factorial (Hernández *et al.*, 2007), como se muestra en el epígrafe 2.5.1.

En las mediciones intervienen tres variables no controladas, es decir, no reguladas en condiciones de laboratorio:

- Temperatura.
- Presión atmosférica
- Velocidad del viento.

Se obtiene como resultado que deben realizarse ocho mediciones para cada punto.

3.8.3. Mediciones para la determinación de la altura del punto de origen del modelo

En la investigación se cumplió con lo establecido en el epígrafe 2.6.1 del procedimiento. Se ubicó la estación mareográfica temporal en la costa próxima a la zona de los trabajos, se utilizó la misma área donde se encontraba enclavada una estación mareográfica para los trabajos del campo de boyas en el año 1996 (figura 3.4). Se utilizaron tres reglas de fibra graduada cada un centímetro,

colocadas sobre acero hincado en el fondo en una base de hormigón y atada a una estaca de madera (figura 3.5).

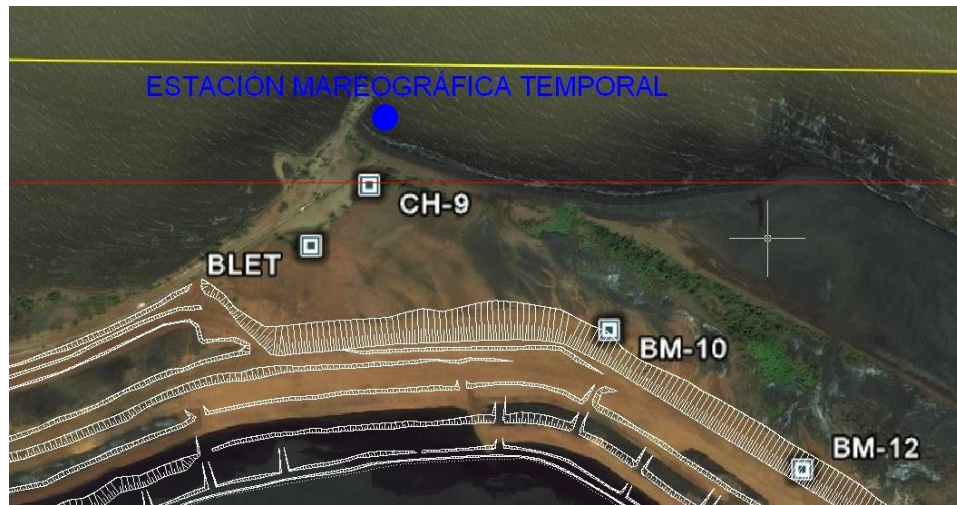


Figura 3.4. Ubicación de la estación mareográfica temporal.

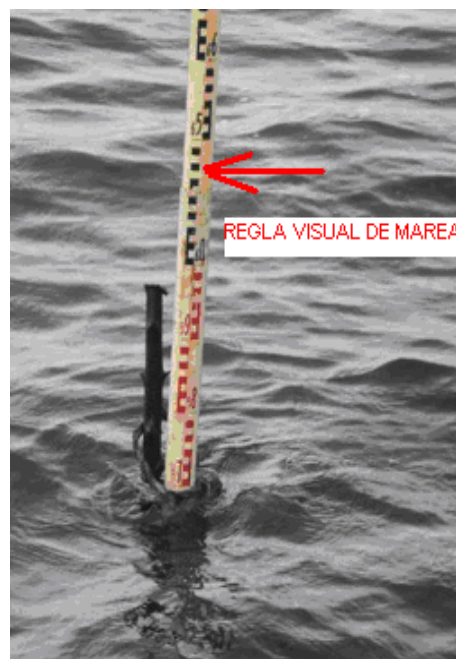


Figura 3.5. Ubicación de una de las reglas de la estación mareográfica temporal.

Se proyectó un circuito de nivelación cerrada partiendo de la estación mareográfica temporal, tocando el monumento Blet y cerrando en el punto de partida (figura 3.6). Se cumplió con la secuencia de trabajos contenidos en el

epígrafe 2.6.1; los resultados del ajuste de los promedios de los ciclos de observación se muestran en el anexo 9.

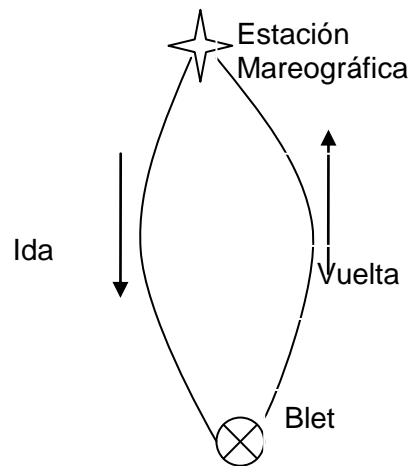


Figura 3.6. Esquema del circuito de nivelación proyectado.

3.9. Análisis comparativo de las coordenadas altimétricas del punto Blet

La estación Blet contaba con valores de altura referida al nivel medio del mar en el sistema de alturas nacionales llamado Siboney, obtenidas con trabajos de densificación anteriormente realizados. En la tabla 3.15 se puede observar la diferencia entre ambas alturas.

Tabla 3.15. Análisis comparativo entre las alturas del punto Blet

Punto	Altura nacional (m)	Altura NMM Moa (m)	Diferencia (m)
Blet	2,454	2,367	0,087

Como anteriormente se refirió, se cuenta con el levantamiento topográfico a escala 1:500 y 56 puntos de apoyo de la presa de colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, donde las alturas están referidas al sistema nacional. Para la obtención del modelo se decidió hacer dos variantes: una con las alturas en ese sistema y otra con el resultado del estudio de la marea de Moa, con el fin de establecer un análisis comparativo de las exactitudes del modelo,

para transformar los demás puntos de apoyo y el levantamiento topográfico al sistema de alturas obtenido durante la investigación.

3.10. Trabajos de gabinete para determinar el modelo de ondulaciones del geoide

Para la realización del procesamiento de la información en la obtención del modelo de ondulaciones del geoide se logran integrar los trabajos de campo en un sistema de información geográfica, tomando como base mapas generados en modelos de superficie 3D.

Para cumplir la tarea se consideró realizar dos modelos digitales del terreno: un modelo que representara el levantamiento topográfico a escala 1:500 con las alturas referidas al sistema de alturas nacional y otro referido al sistema obtenido en la investigación mediante el estudio de la marea en la costa de Moa; igualmente se construyó un modelo digital de alturas elipsoidales y uno de correcciones gravimétricas (anexo 15).

En la transformación de las alturas de los puntos experimentales del sistema nacional al sistema de altura resultado del estudio del nivel medio del mar, tomando como base el punto de origen del modelo, se utiliza el software Cartomap cumpliendo el procedimiento descrito en su manual de usuarios.

Para la creación del sistema de información geográfica se importaron todos los planos de modelos digitales creados anteriormente para realizar un análisis espacial analítico con operaciones matemáticas (Almaguer, 2005), para obtener como resultado un nuevo mapa. Se cumplió con los pasos descritos en el epígrafe 2.6.2.

3.11. Determinación del modelo de ondulaciones del geoide a partir del análisis geoespacial de planos aplicando herramientas de SIG

La ecuación 1.1 define la determinación del modelo de ondulaciones del geoide por las diferencias de alturas elipsoidales y ortométricas. El método combinado desarrollado durante la investigación se fundamenta en dicha expresión pero se aplican correcciones por la influencia de las perturbaciones de gravedad y en el cálculo intervienen modelos digitales. Se aplicó la ecuación 2.22 que fue desarrollada en este trabajo para determinar el modelo del geoide local a partir del análisis geoespacial de planos en plataformas SIG.

3.12. Cálculo de la corrección por el efecto de las perturbaciones de gravedad

Como se puede observar en la ecuación 2.22 interviene un modelo digital de correcciones gravimétricas. Para calcular este modelo se realizó un análisis de los valores obtenidos de alturas ortométricas por los métodos de densificación altimétrica; se consideró el efecto que causan las perturbaciones de las anomalías de gravedad en el terreno y, a su vez, en la figura física del geoide. Para darle cumplimiento a esta tarea fue necesario realizar el cálculo de la atracción gravitacional en los puntos experimentales y la sustracción de la fuerza de la gravedad medida en cada estación. Según Sánchez (2010) tanto las depresiones como las elevaciones en los alrededores de la estación disminuye la gravedad medida, por esto la corrección topográfica siempre es positiva.

Para la realización del cálculo se determinó en cada punto experimental la corrección a la topografía por el efecto de la gravedad relacionado cada uno de ellos con el origen del modelo del geoide (Blet), aplicando la ecuación (3.11). Los

datos de los puntos experimentales calculados fueron convertidos a un fichero de texto en formato (txt), con el objetivo de ser cargado por el software encardado para la modelación de superficie 3D.

$$\delta g_{topo} = 2f \times g_{med} \frac{h^2}{r^3} \quad (3.11)$$

Donde:

δg_{topo} : Corrección a la topografía por gravedad

f : Constante gravitacional: $6.67 \times 10^{-11} kg^{-1}m^3S^{-2}$

g_{med} : Gravedad medida en la superficie del terreno

h^2 : Diferencia de altura entre el punto de origen y el punto a determinar

r^3 : Distancia entre el punto de origen del modelo y el punto a determinar.

Una vez determinada la corrección gravimétrica para cada punto experimental, se realizó una interpolación en el software Autocad Civil 3D creando un modelo digital de correcciones gravimétricas (figura 3.7).

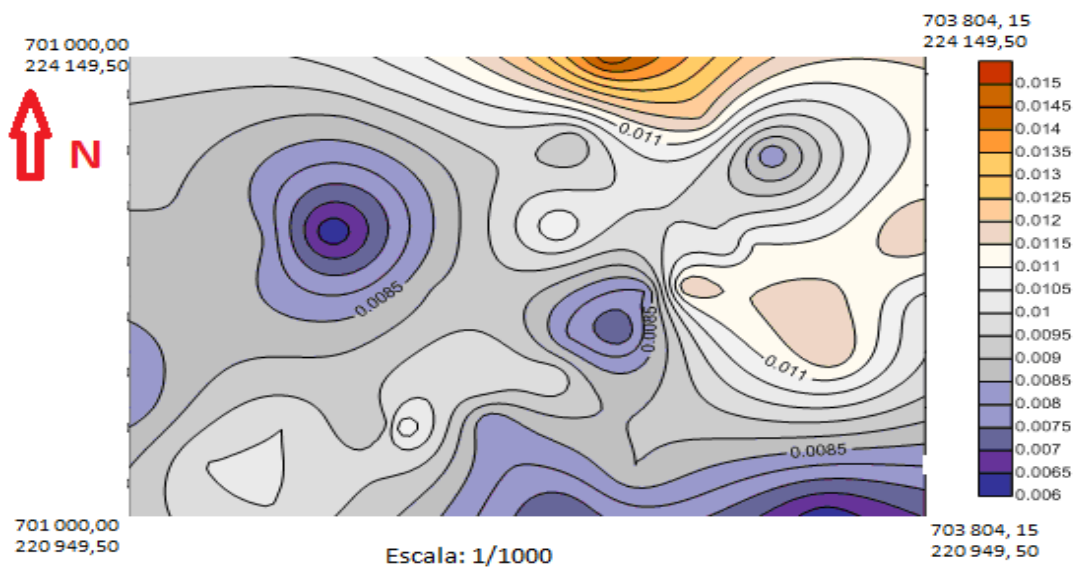


Figura 3.7. Modelo digital de correcciones gravimétricas (MDCG).

3.13. Cálculo de los modelos de ondulaciones del geoide

Aplicando la ecuación (2.22) en el sistema de información geográfica se determinaron dos modelos de ondulaciones del geoide, teniendo en cuenta lo descrito en el epígrafe (2.6.2): en un primer caso utilizando el modelo digital del terreno en los puntos experimentales referidos al nivel medio del mar de la costa de Moa y en un segundo caso el MDT referido al sistema nacional (figuras 3.8 y 3.9).

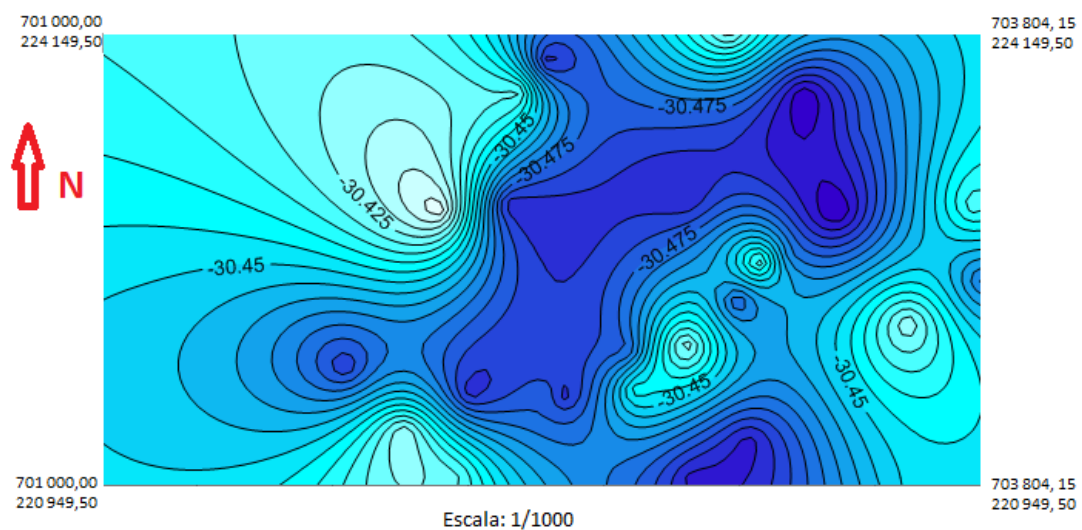


Figura 3.8. Modelo referido al NMM de la costa de Moa (MOG-1).

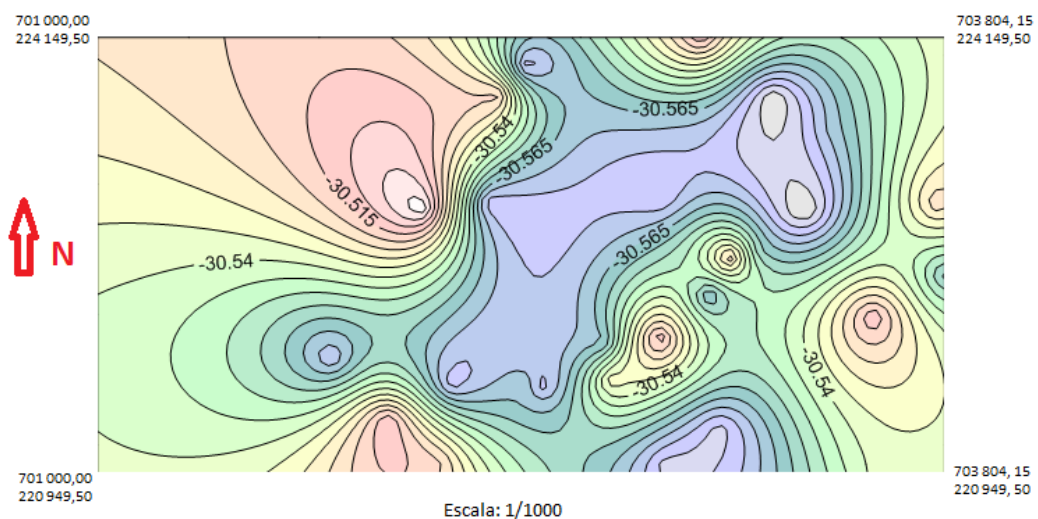


Figura 3.9. Modelo referido al sistema nacional (MOG-2).

3.14. Validación de los modelos

Los modelos calculados se sometieron a un proceso de validación para determinar la exactitud en la determinación de las coordenadas espaciales fue necesario realizar levantamientos topográficos en la presa de colas utilizando el sistema GPS en su modo diferencial (figura 3.10).



Figura 3.10. Trabajos de campo para la validación de los modelos.

Con los resultados de campo se obtuvo un modelo digital de alturas elipsoidales, el mismo fue incorporado al SIG y sometido a un proceso de operación matemática con cada uno de los modelos de ondulaciones del geoide calculados anteriormente, utilizando la ecuación 3.12:

$$MDT = MDAE - MOG \quad (3.12)$$

Donde:

MOG: Modelo del geoide

MDAE: Modelo digital de alturas elipsoidales

MDT: Modelo digital del terreno.

Se obtuvieron dos modelos digitales del terreno con coordenadas altimétricas referidas a diferentes figuras de referencias, que posteriormente en el software ArGis se compararon con los MDT correspondientes al sistema de referencia empleado, pertenecientes al levantamiento topográfico a escala 1:500, realizado con estaciones totales; como resultado se generaron dos planos de las principales desviaciones (figuras 3.11 y 3.12).

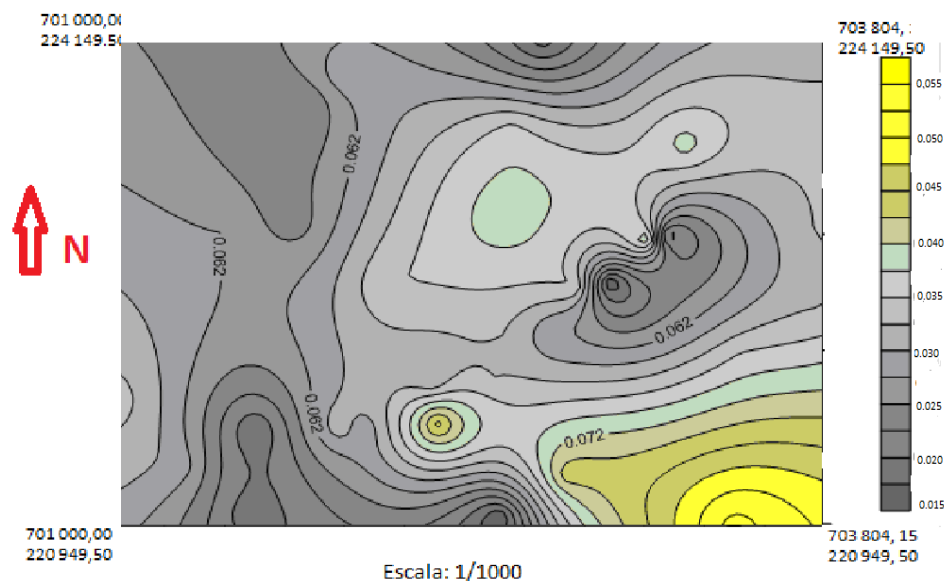


Figura 3.11. Plano de las desviaciones en la medición de alturas utilizando el modelo de ondulaciones del geoide referido al NMM de la costa de Moa.

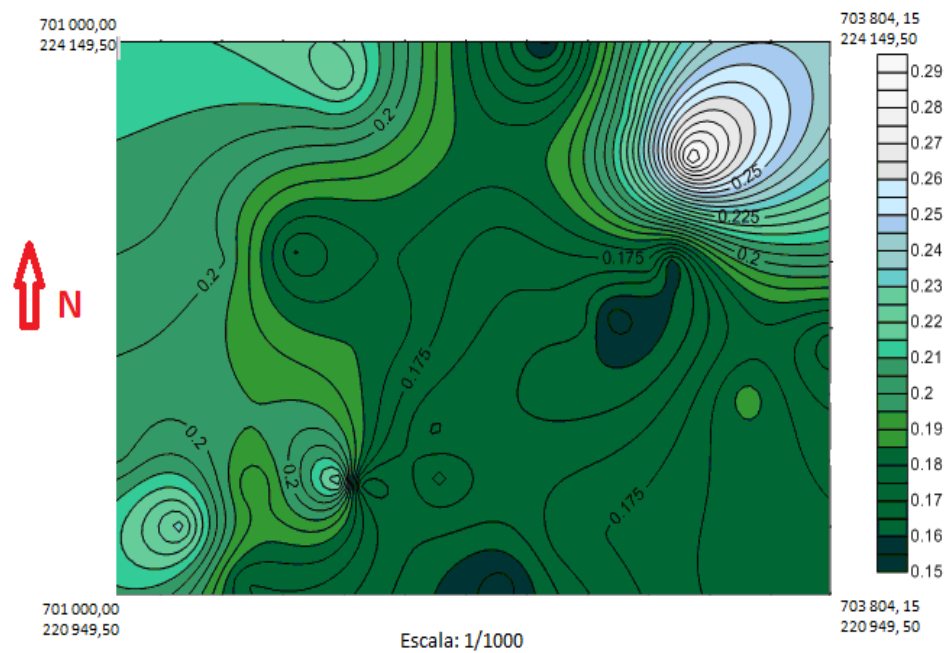


Figura 3.12. Plano de las desviaciones en la medición de alturas utilizando el modelo de ondulaciones del geoide referido al sistema de coordenadas nacionales.

3.15. Análisis comparativo de los modelos

En la tabla 3.16 se realiza un análisis comparativo de la exactitud de los modelos de ondulaciones del geoide determinados en la investigación.

Tabla 3.16. Evaluación de la exactitud de los modelos de ondulaciones del geoide calculados

Evaluación de la exactitud de los modelos		
Modelos	Valor mínimo alcanzado (cm)	Valor máximo alcanzado (cm)
MOG-1	1,5	5,7
MOG-2	15	29

Como se muestra en la tabla 3.17 en el modelo de ondulaciones del geoide (MOG-1), la exactitud en la determinación de las alturas se encuentra en el rango de los 1,5 a 5,7 cm respectivamente, lo que permite ampliar el campo de empleo

de la tecnología GPS en los trabajos topográficos en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa, por tanto, fue seleccionado como modelo a utilizar en la actividad minera del níquel y como origen para generalizar en todos los yacimientos de la región.

Los parámetros técnicos del modelo (MOG-1) se muestran en la tabla 3.17.

Tabla 3.17. Estadísticas del modelo de ondulaciones del geoide

Parámetros	Ondulaciones (m)	Latitud (° ' ")	Longitud (° ' ")	Total de Datos
Valor máximo	-30.500	20 39 08	-74 53 15	...
Valor mínimo	-30.406	20 39 32	-74 53 48	...
Punto de origen	- 30.420	20 39 35	-74 53 25	...
Número de columnas	...	...	...	14
Número de filas	...	...	...	16
Número de puntos	...	...	...	56

Con las estadísticas en el software Leica Geoffice Combinado, se creó un fichero del modelo de ondulaciones del geoide en la extensión (gem), el cual es exportado desde la computadora a los receptores GPS para la ejecución de trabajos en tiempo real o utilizado en el mismo programa informático para el procesamiento de las mediciones.

El modelo de ondulaciones del geoide (MOG-1) se utiliza desde los inicios del proyecto (2455 control topográfico fase cinco, presa de colas en explotación) hasta la actual fase seis, con buenos resultados. En el control de calidad realizado al 10% del proyecto según establece la instrucción de trabajo ITT-05 de la empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel, se evaluó como satisfactorio (anexo 16).

3.16. Evaluación de la efectividad económica del procedimiento propuesto

Al establecer los nuevos parámetros técnicos de medición para las estaciones totales y el modelo de ondulaciones del geoide en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa, partiendo de la modelación de coordenadas espaciales, queda demostrada la factibilidad económica para la topografía minera, con una destacada eficiencia y rapidez en la ejecución de los trabajos.

Con el objetivo de conocer la efectividad económica del procedimiento propuesto, se calculó una ficha de costo a la poligonal Che Guevara de I categoría, ejecutada durante la validación de la investigación, la cual recorre el itinerario de nueve kilómetros desde la presa de colas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara hasta el yacimiento Punta Gorda, ocupando un total de cinco puntos. Se analizaron solo los gastos asociados a los trabajos de campo.

La basificación de la técnica y el personal se instauró en CEPRONIQUEL, a una distancia promedio de 15 km del área de los trabajos. Se realizó un primer cálculo de los gastos, considerando las instrucciones técnicas para levantamientos a escalas 1: 2 000, 1: 1 000 y 1:500, y en un segundo caso, se tuvo en cuenta la realización de estos trabajos aplicando el procedimiento propuesto (anexo 17).

Para determinar los plazos de ejecución de la poligonal se utilizó el catálogo de normas de tiempo para los trabajos de la topografía minera, certificado por la ONHG (tabla 3.19). En el cálculo a partir de los parámetros obtenidos por la modelación de coordenadas espaciales, solo se consideró la etapa de medición de puntos para la poligonal de primera categoría de la tabla 3.18.

Tabla 3.18. Plazo de ejecución de la poligonal por catálogo de normas actuales

Producto	U/M	Tiempo por norma	Volumen	Tiempo total (horas)
Medición de puntos para poligonal I categoría	(horas punto)	1,8 946	5 puntos	9,4 730
Nivelación técnica de doble puesta de instrumento.	(horas/km)	2,1 468	9 mm	19,3 212
Tiempo total en días				4

Si se realiza un análisis comparativo del tiempo de ejecución de los trabajos y sus gastos asociados, entre las mediciones realizadas por las instrucciones técnicas para levantamientos topográficos a escalas 1: 2 000, 1: 1 000 y 1:500; y los parámetros obtenidos a partir de la modelación de coordenadas espaciales, se puede observar en la tabla 3.19, la efectividad económica del procedimiento propuesto en esta investigación, logrando disminuir los gastos asociados al 68% y reducir el plazo de ejecución de los trabajos en un 50%.

Tabla 3.19. Análisis comparativo del tiempo de ejecución y los gastos de la poligonal.

Indicadores	Poligonal medida por instrucciones actuales	Poligonal medida por la modelación de coordenadas espaciales	%
Gastos (pesos)	896,16	610,32	68
Tiempo de ejecución (días)	4	2	50

3.17. Conclusiones parciales

1. Se determinaron los parámetros de medición para la poligonometría y levantamiento topográfico con estaciones totales en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa a partir de la modelación de coordenadas espaciales.
2. Se calcularon y evaluaron las exactitudes de los modelos del geoide elaborados con resultados satisfactorios a partir del análisis geoespacial de mapas integrados en un sistema de información geográfica.

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se elaboró un procedimiento que permite determinar a partir de la modelación de coordenadas espaciales, los parámetros técnicos de medición para las tecnologías de estaciones totales y sistema de posicionamiento global en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa.
2. Se determinó un modelo de ondulaciones del geoide a partir del procedimiento propuesto que permite obtener la posición altimétrica de puntos sobre la superficie, cumpliendo con la exactitud que exigen los trabajos de la topografía minera y ampliando el campo de empleo de la tecnología GPS en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa.
3. La modelación de coordenadas espaciales permitió fusionar los métodos de densificación poligonometría y nivelación en un método más productivo y económico.
4. Se diseñó un sistema de información geográfica en el Software ARGIS que permitió el cálculo y validación del modelo de ondulaciones del geoide, el mismo queda establecido para el procesamiento de los trabajos con GPS en la zona del modelo.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Investigar los parámetros técnicos de medición de la nueva tecnología 3D Láser Escáner, relacionadas a las coordenadas espaciales en los yacimientos lateríticos de la región minera de Moa.
2. Continuar los estudios de los modelos de ondulaciones del geoide, para obtener mayores exactitudes que permitan dar respuestas a trabajos geodésicos.
3. Aplicar el procedimiento elaborado en los trabajos de la topografía minera en los yacimientos lateríticos de la región de Moa y su implementación en otras regiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, L. (2009). *Determinación de índices de vulnerabilidad geotécnica por métodos geodésicos*. La Habana. Tesis doctoral: Instituto Técnico Militar "José Martí".
2. Alfonz, W. (1984). *Topografía*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
3. Acosta Gutiérrez, R. P., y Rodríguez, E. (1999). *Evaluación de la separación lineal entre las superficies de referencia seleccionadas y el Datum Vertical de la República de Cuba*. Holguín, Cuba: GEOCUBA (paper).
4. Acosta Gutiérrez, R. (2005). *El materialismo dialéctico e histórico y la figura de la tierra*. Trabajo sobre problemas sociales de la ciencia. La Habana: Instituto Técnico Militar "José Martí" (paper).
5. Acosta Gutiérrez, R. P. (2001). *Modelo del geoide Cuba 2000*. I Jornada de ciencia e innovación tecnológica de Geocuba y II Seminario de Geomática. La Habana, 30 de noviembre a 1 de diciembre de 2001.
6. Acosta Gutiérrez, R. P. (2001). *Nivelación GPS en las condiciones de la República de Cuba*. I Jornada de ciencia e innovación tecnológica de Geocuba y II Seminario de Geomática. La Habana, 30 de noviembre a 1 de diciembre de 2001.
7. Alonso, M., y Finn, E. (1986). *Física vol.1*. México: Editorial Wesle Iberoamericana.
8. Acosta Gutiérrez, R. (2006). *Proyecto de desarrollo tecnológico perfeccionamiento, modernización y desarrollo de la infraestructura geodésica en la región niquelífera de Holguín*. La Habana: GEOCUBA.

9. Acosta Gutiérrez, R. P., y García, J. A. (2007). *Modelo de las anomalías de la gravedad para Cuba*. Informática 2007, CITMATEL 2007, ISBN: 978-959-286-002-5, La Habana, 12-16 de febrero de 2007.
10. Apunte para el laboratorio. Física 62.01 *"Introducción teórica."*: Disponible en: <http://exa.unne.edu.ar/depar/areas/fisica/electymagne/TEORIA/dinamica/trabao/pendulo/pendulo.htm>
11. Arango, A. (1983). *Topografía I*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
12. Almaguer, Y. (2005). *Evaluación de la susceptibilidad del terreno a la rotura por desarrollo de deslizamientos en el yacimiento Punta Gorda*. Moa, Cuba. Tesis doctoral: Instituto Técnico Superior Minero Metalúrgico.
13. Alzate, J. B., y Escobar, A. E. (1992). *Adquisición de datos para un SIG*. 1er. Simposio Internacional sobre sensores remotos y sistemas de información geográfica para el estudio de riesgos naturales. Bogotá, Colombia.
14. Ávalos, D. (2002). El geoide para el área mexicana y sus aplicaciones. Notas. *Revista de información y análisis*, 20, 25-30.
15. Baird, M. L. (1991). *Experimentación, una introducción a la teoría de mediciones y al diseño de experimentos*. México: Prentice Hall Iberoamericana.
16. Batrakov, Y.G. (1987). *Redes geodésicas de densificación*. Moscú: Nedra.
17. Bakanova, V. V. (1980). *Geodesia*. Moscú: Nedra.
18. Batista, Y. (2012). *Procedimiento para la determinación de un modelo del geoide local*. Moa, Cuba. Tesis de maestría: Instituto Superior Minero Metalúrgico.

19. Banyai, L. (2006). Application of Full Roving GPS Observation Strategy for Monitoring Local Movements, 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006. 10 p.
20. Belete , O. (1998). *Vías para el perfeccionamiento del cálculo de volumen de mineral extraído en yacimientos lateríticos cubanos*. Moa, Cuba. Tesis doctoral: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
21. Belete, O. (2008). *Topografía General*. La Habana: Editorial Felix Valera.
22. Belete, O., y Batista , Y. (2012). Algunas consideraciones sobre la exactitud de las redes de levantamiento topográfico. *Minería y Geología*. 29(3): 56-64.
23. Benítez, R. (1982). *Topografía para ingenieros civiles*. Dos tomos. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
24. Bosque , J. (1992). *Sistemas de información geográfica*. Madrid: Ediciones Rialp.
25. Bombino, N., Sánchez, E., y Pérez, M. (1988). *Geodesia para ingenieros Aerofotogeodestas*. La Habana: Editorial, Pueblo y Educación.
26. Bombino. N., Sánchez, E., González, B., y Pozo, R. (1989). *Redes geodésicas y planimétricas*. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
27. Bolshakov , V., Gaiaev, P. (1989). *Teoría de la elaboración matemática de mediciones geodésicas*. Moscú: Editorial Mir.
28. Bracken, W. (1990). "Information technology in Geography and planning. Including principles of G.I.S.". London: Routledge.
29. Burrough, P.A. (1988). Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment". Oxford: University press.
30. Castiglioni Perazzo, R. (1981). *Física 1*. Buenos Aires: Editorial Troquel.

31. Cernuschi, F., y Greco, F. 1968, Teoría de errores de mediciones: Editorial EUDEBA. 322pp.
32. Cebrián, J. A., y Mark, D. (1986). Sistemas de Información Geográfica. Funciones y estructuras de datos. *Estudios Geográficos*, 188, 277-299.
33. Coello, N., y Wisweh, L., Determination and Considerations for the Measurement Deviations in Manufacturing Process. Germany: Editorial Otto von Guericke University.
34. Comisión Oceanográfica Intergubernamental. (1994). Manual de medición e interpretación del nivel del mar. Volúmenes I y II. UNESCO. 78 p.
35. Colectivo de autores. (1987). *Instrucciones técnicas para levantamientos topográficos a escala 1:2000, 1:1000, 1:500*. ICGC. Editorial del Centro de Información de la Construcción, La Habana, 76 p.
36. Cordova, C. (1985). *Geodesia*. Tomo I. La Habana: Editorial Ciencia Técnica.
37. Dalda, M. A., Cano, V. M., Gonzáles M. F., Sánchez, S. J. (2003). *IV curso GPS para Geodesia y Cartografía*. Cartagena de Indias. Colombia.
38. Desdin, R. (2009). *Caracterización de los movimientos horizontales recientes de la corteza terrestre en la región de Mayarí, Nicaro y Moa, con el empleo de tecnología de avanzada (GPS)*. Tesis doctoral. La Habana: Instituto Técnico Militar "José Martí".
39. Díaz, G. (2001). Instrucciones para el trabajo en las estaciones provisionales de marea (paper).
40. Dixon, K. (2001). New methods for Rapid High Altitude Surveys, GPS World, March 2001: 18-24 p.
41. Donofrio, E., Balay, C., y Balestrini, C. (1982), Manual de medición de

- mareas. Informe Técnico N°11/82. Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval. 120pp.
42. Donofrio, E. (1984). Desarrollo de un nuevo sistema de procesamiento de información de mareas. Informe Técnico N°25/84. Departamento Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval. 167pp.
43. Fargas, M. (2001). *Redes de apoyo*. Provincia de Toledo, España (paper).
44. Ferrer, R. (1985). *Topografía Minera*. Tomo I. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
45. Ferrer, R. (1985). *Topografía Minera*. Tomo II. La Habana: Editorial Pueblo y Educación.
46. Franco, J. (2008). Nociones de Topografía. *Geodesia y Cartografía*. España: Universidad de Cantabria.
47. Froment, L. (2011). *Especificaciones técnicas para levantamientos topográficos* (paper).
48. García, J. (1997). *Estudio de uso del GPS en el TOM*. Ponencia en XII Forum de Ciencia y Técnica. Holguín, Cuba: GEOCUBA ORIENTE NORTE (paper).
49. García, F. (1978). *Topografía General y Aplicada*. 7ma Edición. Madrid.
50. Ganshin, V. M., y Koskov, B. (1977). *Instrucciones técnicas para levantamientos a grandes escalas*. Moscú: Editorial Nedra.
51. Goizueta, J. (2008). Sistemas de referencia geodésicos. *Proyecciones cartográficas*. ECAS Técnicos Asociados S.A. 29, 26-38.
52. Halliday, P., Resnick, A., y Krane, L. (1985). *Física para estudiantes de ciencias e ingeniería* 4ta. Edición. Vol. II. México: Editorial Continental.

53. Hernández, R., Fernández, C., y Pilar, C. (2007). *Metodología de la investigación*. IV Edición. Nueva York: Editorial MGRW-HILL.
54. Herrera, W. (2012). *Determinación del coeficiente conjunto de curvatura y refracción en yacimientos lateríticos cubanos*. Tesis de maestría. Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
55. Holanda Blas, H., y Bermejo, B. (1998). *GPS y GLONASS. Descripción y aplicaciones*. Madrid (paper).
56. Hoyer. M., Wildermar, E., Jiménez, L., Suárez, H., y García, H. (2004). *Procesamiento de las mediciones satelitarias GPS del proyecto Densificación REGVEN*. Caracas: PDVSA-REGVEN.
57. Hoyer. M., Wildermar, E., Royero, G., y Suárez, H. (2002). *Mediciones geodésicas GPS en el área del sistema hidráulico Yacambú-Quíbor*. España: Laboratorio de geodesia física y satelital, Luz Chaparro.
58. Hundiel, S. (2008). *Manual de topografía*. España (paper).
59. Instrucciones técnicas para la realización de los trabajos topográficos y mineros (1973). Leningrado: Instituto Minero de Leningrado.
60. Instrucciones técnicas para levantamientos topográficos a escala 1:2000, 1:1000 y 1:500. (1987). Cuba. Ministerio de la construcción.
61. Instrucción técnica de trabajo ITT-002, Trabajos de campo, (2011). Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel. Revisión 4.
62. Instrucción técnica de trabajo ITT-005, Trabajos de control de calidad, (2011). Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel. Revisión 4.
63. Instrucción técnica de trabajo ITT-007, Trabajos con estaciones totales, (2011). Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel. Revisión 4.

64. Instrucción técnica de trabajo ITT-008, Trabajos con GPS, (2011). Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel. Revisión 4.
65. Instrucciones oceanográficas No 1,. (2005). Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos. Servicio Hidrográfico y oceanográfico de Chile. 30p.
66. Kaftan, B. I., y Sherebiakova, L. J. (1990). *Métodos geodésicos para la solución de tareas geodinámicas*. Tomo 28. Moscú: Serie "Geodesia y Aerofotogeodesia".
67. Lemoine, A. (1997). The Development of the NASA GSFC and NINA joint geopotential model. In Gravity Geoid Mar Geod, Int. Symp. No.117, Tokyo Japan, 30 September-5 October 1996 (GraGeoMar 1996). Springer, Berlin Heidelberg, New York.
68. Lebedev, N. (1984): *Geodesia aplicada a la ingeniería*. Moscú: Editorial Nedra.
69. Levchuk, G., y Konosov, V. (1981): *Geodesia aplicada*. Moscú: Editorial Nedra.
70. Legrá, A. (2007). Metodología de la investigación científica. Soporte digital (paper).
71. Legrá, A., y Silva, O. (2012). *La investigación científica; conceptos y reflexiones*. La Habana (paper).
72. López, S. (1996). *Topografía*. Madrid, España: Universidad Politécnica.
73. Marcelo, S., Robet, T., y Hernández, N. (2011). *Algunos aspectos sobre alturas ortométricas y normales* (paper).
74. Manual de ingeniería de la Armada de los EEUU, (Engineering and Design Topographic Surveying). (1994).

75. Manual de Calidad de la Empresa de Ingeniería y Proyectos del Níquel.
Revisión 6. (2014).
76. Malys, S. (1997). Status of the World Geodetic System 1984; Proceeding of GPS ION-97; Kansas City: MO.
77. Metodología para el levantamiento topográfico a grandes escalas con estación total Leica 808. Geocuba (2008).
78. Mikhail, E. M. (1981). Analysis and Adjustment of Survey Measurement, Van Nostrand Reinhold. Nueva York.
79. Molina M. I. (1997). Simple linearization of the simple pendulum for any amplitude, Phys.
80. Moraimo, F. J. (2000). *Materialización del sistema de referencia internacional en Argentina*. Tesis doctoral. La Plata, Argentina.
81. Muffatti, L., y Cian, N. (2007). *Cálculo de aceleración de la gravedad con péndulo y medición de constante elástica de un resorte*. Universidad de Buenos Aires. Argentina.
82. NCGIA., Core, C. (1990). Introducción to GIS. II. Technical issues in GIS. III. Application issues in GIS". Santa Bárbara, CA. National Center for Geographic Information and Analysis / University of California.
83. Norma Cubana: RC 3011 Relleno general, (1987). Ministerio de la Construcción. Cuba.
84. Norma Cubana: RC 3008 Excavación en canteras de préstamos, (1987). Ministerio de la Construcción. Cuba.
85. Norma Cubana: RC 3013 Terraplenes para obras viales, (1987). Ministerio de la Construcción. Cuba.

86. Norma Cubana: RC-3016 Perfilado de taludes, (1987). Ministerio de la Construcción. Cuba.
87. Norma ISO 1003. (2003) Directrices para la documentación de sistemas de gestión de la calidad. Organización internacional de normalización.
88. Norma ISO 9001. (2000) Sistemas de gestión de la calidad, requisitos). Organización internacional de normalización.
89. Notario, A. (1999). *Compendio sobre metodología de la investigación científica*. Versión digital.
90. NMX-CH-140-IMNC-2002 Guía para la expresión de la incertidumbre de las mediciones equivalente a Guide to the Expression of Uncertainty Measurement, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML, México. (1995).
91. NC OIML V2. (1995). *Vocabulario internacional de términos generales y básicos de metrología*. 1era Edición. La Habana.
92. Núñez, J. (2004). *Ética, Ciencia y Tecnología*. La Habana: Editorial Félix Varela.
93. Ortiz, R., Rio, M.G., Martínez, J., y Cobos, Y C. (2008). Método para optimizar las mediciones topográficas con aparatos GPS. *Evento Interciencia*. Guatemala.
94. Ochoa, M. A. (1997). *Ajuste de poligonales cerradas utilizando el método de los mínimos cuadrados*. Tesis en opción al título de Ingeniero Civil. España: Universidad de Sonora.

95. Olivera, R. (2010). *Fundamentos del análisis o priori de la precisión de las mediciones ingeniero geodésicas*. V Congreso internacional de agrimensura. La Habana (paper).
96. Peñafiel, J., y Zayas, J. (2001). *Fundamentos del sistema GPS y aplicaciones en la topografía*. La Mancha, España: Delegación territorial de Madrid Castilla.
97. Pérez, S, A. (2004). *Metodología para los levantamiento topográficos a escalas 1:2000, 1:1000 y 1:500 con el uso de las estaciones totales electrónicas*. Tesis de maestría. La Habana: Academia Naval Granma.
98. Ramírez, S. (2006). *Determinación de la aceleración de la gravedad péndulo simple*. Prácticas de Física (paper).
99. Rapp, R. H. (1994). Separation between surfaces of selected vertical datums *Bulletin Geodésique*. Springer-Verlag, 3, 26-31.
100. Rapp, R. H. (1997) Use of potential coefficient models for geoid undulation determinations using a SAR of the heigh anomaly/geoid undulation difference, *Journal of Geodesy*, Springer-Verlag, 71,19-21.
101. Rodríguez, E. (1995). *Cálculo de las ondulaciones del geoide para los puntos de primer orden de la red geodésica nacional*. X Forum de Ciencia y Técnica. Holguín, Cuba: GEOCUBA.
102. Rodríguez, E. (2002). *El posicionamiento relativo GPS de alta precisión, experiencias y resultados*. III Congreso internacional Geomática 2002. La Habana, Cuba.

103. Rodríguez, E. (2004). *Perfeccionamiento de la red planimétrica nacional mediante el empleo del sistema de posicionamiento Global GPS*. Tesis doctoral. La Habana: Instituto Técnico Militar.
104. Rodríguez, E. (2005). *Metodología para la creación y modernización de las redes geodésicas empleando la tecnología GPS* (paper).
105. Rodríguez, E; García, D. P., Olivera, R. R. (2007). *La red geodésica estatal planimétrica de Cuba: Orígenes, evolución y perspectivas para su ulterior perfeccionamiento*. V Congreso Geomática 2007. La Habana.
106. Rodríguez, A. (1998). Estudio morfotectónico de Moa y áreas adyacentes para la evaluación de riesgos de génesis tectónica. Tesis doctoral. Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa.
107. Ramírez, N. y Medina, O. J. (1986). The pendulum - rich physics from a simple system (paper).
108. Rossi, M. Sergio, I. (2007). Medición, incertidumbre y cifras significativas. Disponible en: <http://www.fi.uba.ar/materias/6201/MQmedierrcifrsig.pdf>. (Consulta: 11 de septiembre de 2012).
109. San, J. J., Atkinson, D.J., Gómez, A., y Salvador, F. (2007). Técnicas geodésicas y fotogramétricas aplicadas al análisis de la dinámica y cartografía del glaciar rocoso activo del corral del veleta (Sierra Nevada), durante el período 2001-2007. *Revista internacional de ciencias de la tierra. MAPPING INTERACTIVO*, 13(2),22-31.
110. Sánchez, M. (2010). *Métodos topográficos clásicos*. Conferencia. España: Universidad de Cantabria.
111. Sears, Z. (1988). *Física Universitaria*. Estados Unidos: Editorial Wesley Iberoamericana.

112. Suárez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Colombia: Editorial Ingeniería de suelos Ltda.
113. USACE.EM.1110-1-1904. (1999) "U.S. Army Corps of Engineers Manual"
"Settlement analysis" Washington, DC 20314-1000, September.
114. Vallejo, C. E. (2003). Medición y procesamiento de la marea. La Habana: Academia Naval Granma.
115. Valle, R. A. (1990). *Cálculo geodésico y su ajuste*. Holguín, Cuba: Editorial Pueblo y educación.
116. Vidueva, N. (1978). Manual del geodesta. Kiev.
117. Wangdi, Ch. (2010). *Empleo de las estaciones totales en obras industriales*. Tesis de ingeniería. Moa, Cuba: Instituto Superior Minero Metalúrgico.
118. Wisweh, L., y Sandau, M. (1999) Determination of the Measuring Uncertainty and its Use for Quality Assessment and Quality Control, Germany: Ed. Otto von Guericke University.
119. Wolfgang, A. (2004). *Guía para estimar la incertidumbre de la medición*. El Marqués, México.
120. Zakatov, P.S. (1981). *Curso de Geodesia Superior*. (En español). Moscú: Editorial Mir.
121. <http://www.geocities.com/CollegePark/Quad/2435/index.html>. Breve historia de los orígenes del método Monte Carlo. (Consulta: 6 de marzo de 2013)
122. <http://www.csep1.phy.ornl.gov/mc/mc.html>. Libro electrónico sobre la simulación Monte Carlo. (Consulta: 6 de marzo de 2013)
123. http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/sec2_1.htm. Diseño de experimentos. (Consulta: 9 de junio de 2013).

ANEXOS

ANEXO 1

MONUMENTOS TOPOGRÁFICOS DE CENTRACIÓN FORZADA



Figura 1. Monumentos topográficos de centración forzada utilizados en los experimentos.

ANEXO 2

**TOLERANCIAS ADMISIBLES Y PARÁMETROS TÉCNICOS DE MEDICIÓN
PARA LOS TRABAJOS DE LA TOPOGRAFÍA MINERA**

Tabla 1. Tolerancias admisibles para la poligonometría

Características	4to orden	I categoría	II categoría	I clase	II clase
Error relativo	1:25 000	1:10 000	1:5000	1:2000	1:1000
Error medio cuadrático de la medición de ángulo, seg.	2	5	10	...	...
Error de cierre angular	$5''\sqrt{n}$	$10''\sqrt{n}$	$20''\sqrt{n}$	$60''\sqrt{n}$	
Longitud límite, km	10	5	3	...	...

Tabla 2. Tolerancias admisibles para la nivelación

Características	IV Orden	Técnica
Error de cierre	$F_n \pm 20\sqrt{L}$	$F_n \pm 50\sqrt{L}$

Tabla 3. Tolerancias admisibles para la determinación de las coordenadas de los piquetes de contornos

Escala	Contornos			En cotas
	De importancia planimetría	En zonas llanas planimetría	En zonas montañosas planimetría	
1:500	0,20 m.	0,25 m.	0,35 m.	0,17
1:1000	0,40 m.	0,50 m.	0,70 m.	0,33
1:2000	0,80 m.	1,0 m.	1,40 m.	0,67

Tabla 4. Parámetros técnicos para la poligonometría

Características	IV orden	I categoría	II categoría	I clase	II clase
Longitud máxima de los lados de la poligonal en km	0,500	0,200	0,100	...	...

Tabla 5. Parámetros técnicos para la nivelación

Indicadores	IV Orden	Técnica
Distancia máxima entre el instrumento y el bastón (m)	100	150
Distancia mínima entre el instrumento y el bastón (m)	3	3

Tabla 6. Parámetros técnicos actuales para levantamiento a escalas 1: 2 000, 1:1 000 y 1:500

Indicadores	Distancia (m)
Distancia del instrumento hasta el prisma en el levantamiento del relieve	150
Distancia del instrumento al prisma en el levantamiento de los contornos	Firmes 100 No firmes 150

ANEXO 3

**REGISTRO PARA EL PROCESAMIENTO DE LAS MEDICIONES
EXPERIMENTALES DE CAMPO CON ESTACIÓN TOTAL**

Tabla 1. Ejemplo de registro utilizado en un experimento con estaciones totales

		Día 29/01/2012	Ciclo: 1		
Experimento: 1		Estación	FNC-3	Hora de medición: 10:40 am	Temp. 29°C
8 Series	Orientación	FNC-2			
Punto FN-C5 MEDIDO	Med. de Distan	Med ang. Vert	x	y	z
1	449,21	89,3301	695295,998	217280,505	234,096
2	449,208	89,3259	695295,996	217280,503	234,105
3	449,208	89,3259	695295,998	217280,505	234,098
4	449,208	89,3246	695296,001	217280,504	234,107
5	449,208	89,3251	695296,001	217280,504	234,105
6	449,208	89,3246	695296,001	217280,504	234,107
7	449,21	89,3244	695296,001	217280,504	234,105
8	449,209	89,3251	695295,997	217280,502	234,107
PORMEDIO	449,209	89,326	695295,999	217280,504	234,104

ANEXO 4

**ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS TOLERANCIAS ADMISIBLES Y LAS
DESVIACIONES OBTENIDAS EN LOS EXPERIMENTOS**

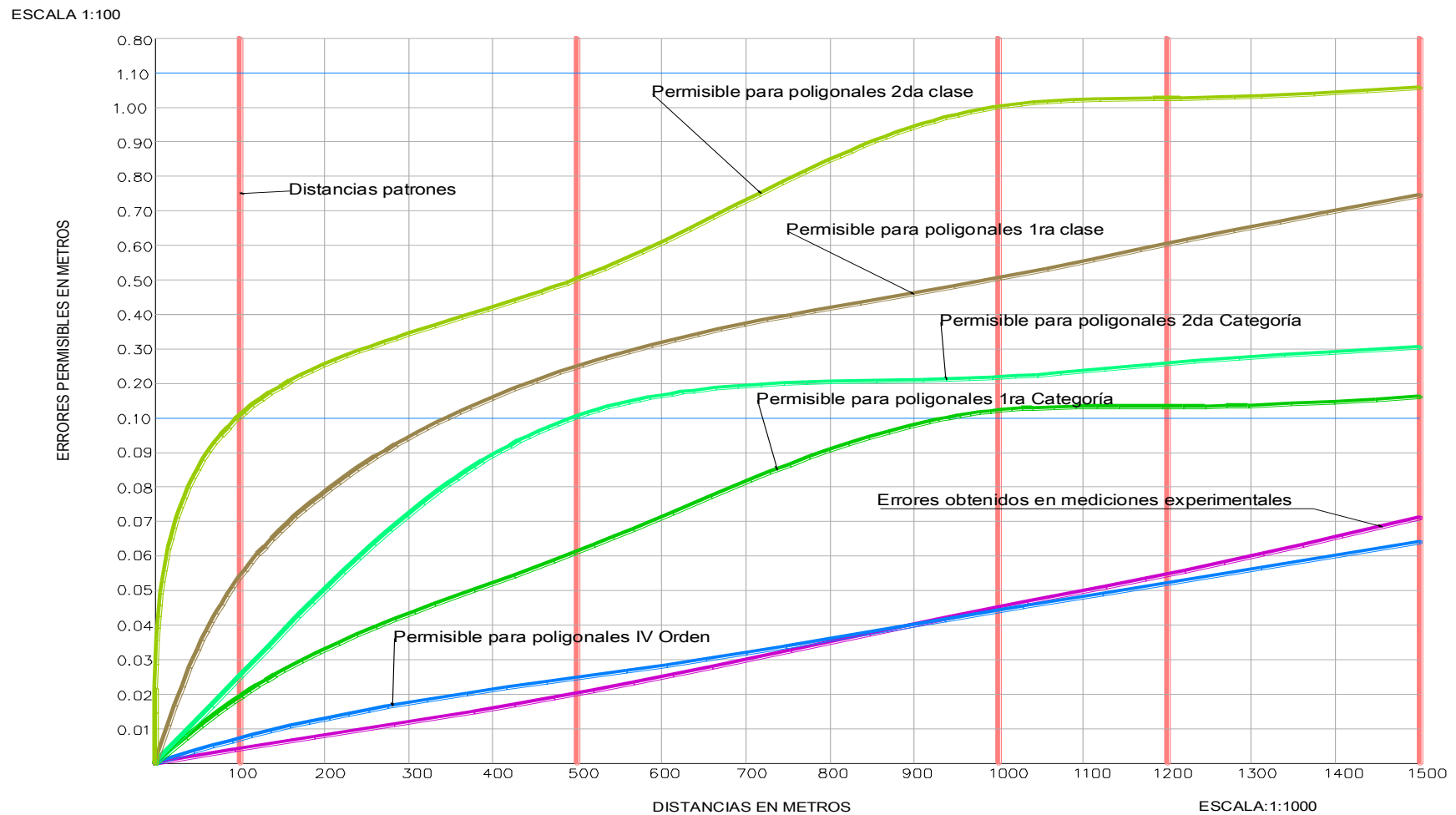


Figura 1. Análisis comparativo de los errores permisibles y los obtenidos en los experimentos para poligonales.

Escala: 1:100

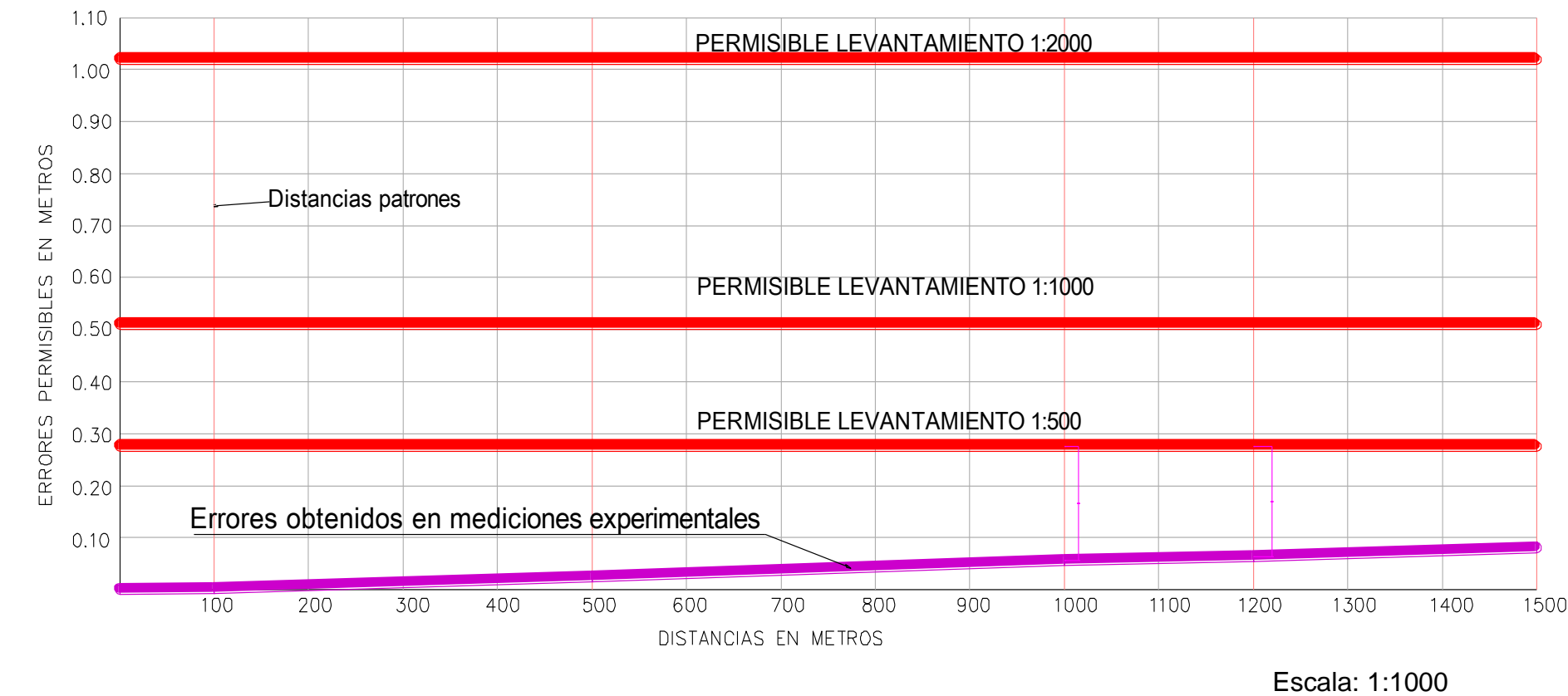


Figura 2. Análisis comparativo de los errores permisibles y los obtenidos en los experimentos para piquetes del levantamiento

ANEXO 5

REGISTRO DE MEDICIONES EN CAMPO PARA GPS



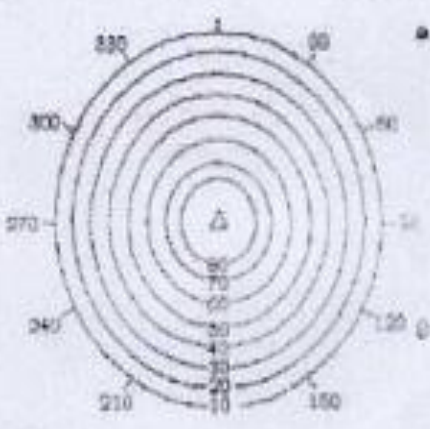
Anotaciones generales				
Características	Denominación	Instrumentos	Modelo	Nº Serie
Proyecto:	Deform Geoides	Receptor:	Leica	12201
Estación:	CH7	Sensor:	-	-
Tipo de puesta:	Estalotra	Terminal:	-	-
Operador:	Jordanys Betto de	Antena:	CX3525L	1211
Fecha:	06/09/2012	Tarjeta Mem:	-	-
Hora Inicial:	8:30 am	Psicrómetro:	Y-232	1031
Hora Final:	8:50 am	Barómetro:	FY-16	0045
Condiciones y parámetros de las mediciones				
Condiciones y parámetros:		I	II	III
Temperatura Húmeda		26.0	24.2	-
Temperatura seca		30.0	28.0	-
Presión atmosférica		1004.0	1004.0	-
Hora local:		16:00 PM	20:00 AM	-
Altura de la antena en metros:		0.261	0.261	-
Excentricidad de la antena:		-	-	-
Altura promedio de la antena:		0.261		
Total de épocas observadas:		-		
Croquis del tipo de montaje de la antena:		Obstrucciones de la señal:		
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Pilar</p>  </div> <div style="text-align: center;"> <p>Trípode</p>  </div> </div>				
Comentarios				
Hora y minutos	Contenido			
	GDP: 2,5			

Figura 1. Registro de campo para mediciones GPS.

ANEXO 6

**REGISTRO DE MEDICIONES EN CAMPO PARA LA DETERMINACIÓN DEL
NIVEL MEDIO DEL MAR**

Libro de campo.

Proyecto: Modelo de ondulaciones del geoide Ciclo: 3

Fecha: 8/05/2012 Regla: 1

Observador: Yordany Esdeben Batista Leguá

Hora	Altura de la regla visual de Marea	Promedio	Observaciones
06:30	0,568	0,568	Poco oleaje
	0,568		
	0,567		
07:30	0,564	0,565	Poco oleaje.
	0,566		
	0,565		
08:30	0,561	0,560	oleaje medio viento moderado
	0,560		
	0,560		
09:30	0,544	0,544	oleaje medio viento moderado
	0,543		
	0,545		
10:30	0,540	0,540	Poco oleaje
	0,540		
	0,540		
11:30	0,538	0,539	oleaje medio
	0,540		
	0,539		
12:30	0,531	0,531	oleaje medio
	0,530		
	0,531		

Anotador: Orlando Balote Fuentes

Figura 1. Ejemplo de un registro de anotación utilizado en la determinación del nivel medio del mar.

ANEXO 7

PROCESAMIENTO DE LA MAREA

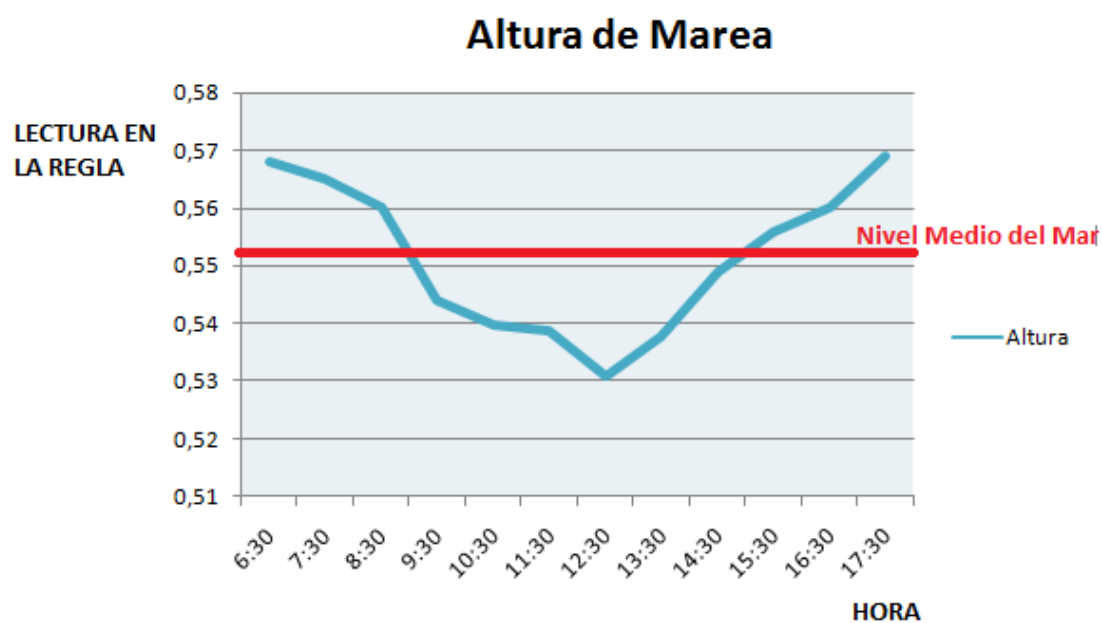


Figura 1. Mareograma que representa el procesamiento de la marea.

ANEXO 8

COMPENDIO DE NIVELACIÓN

Tabla 1. Ejemplo de un compendio de nivelación en un ciclo de observación

Proyecto:		Fecha:	13/09/2012
Valor		Ciclo:	3
Cota EMT	0,000	Regla de marea	1
Cota EMT	0,000		

Punto	Distancia (m)	Desnivel (m)	Cota medida (m)	Corrección (m)	Desnivel Ajustado (m)	Cota (m)
Blet	60,67	2,376	2,376	-0,005	2,371	2,371
ET Mareográfica	60,52	-2,367	0,009	-0,004	-0,005	0,000

Error obtenido 0,009 m

Cota de salida	0,000 m
Cota de llegada	0,009 m
Diferencia	-0,009 m
Permisible	0,017 m
Distancia total	0,121 Km

Yordany E. Batista Legrá.

Orlando Belette Fuentes

ANEXO 9

**TABLA RESUMEN DE LOS CICLOS DE OBSERVACIÓN PARA OBTENER
LA ALTURA DEL PUNTO DE ORIGEN DEL MODELO DE ONDULACIONES
DEL GEOIDE**

Tabla 1. Tabla de los ciclos de observaciones de marea y nivelación para determinar la altura del punto de origen del modelo

Ciclos	Promedio de lectura regla visual de marea			Altura del punto Blet desde reglas de marea			Altura del punto Blet (m)
	R1 (m)	R2 (m)	R3 (m)	R1 (m)	R2 (m)	R3 (m)	
1	0,568	1,375	1,622	2,371	2,373	2,369	2,371
2	0,720	1,528	1,774	2,358	2,369	2,366	2,364
3	0,516	1,321	1,575	2,372	2,376	2,372	2,373
4	0,636	1,449	1,691	2,358	2,364	2,361	2,361
Promedio							2.367

ANEXO 10

POLÍGONO DE PUNTOS DE CENTRACIÓN FORZADA

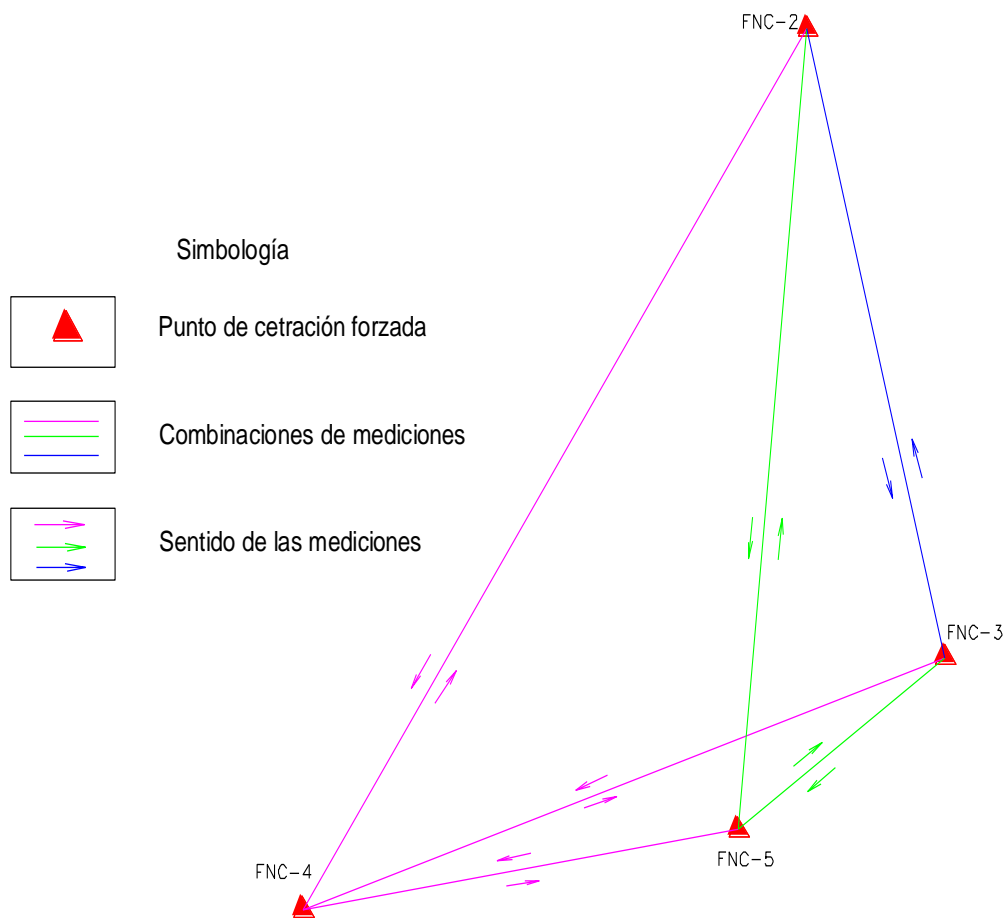


Figura 1. Combinaciones de mediciones en polígono de puntos de centración forzada.

ANEXO 11

CÁLCULO DE LA CANTIDAD DE SERIES DE OBSERVACIONES

Cálculo del error de colimación

$$m_v^2 = \frac{30''}{v} = \frac{30''}{30} = 1''$$

Cálculo de la cantidad de series de observaciones

$$K = \frac{m_\beta^2}{m_v^2 + \frac{m_o^2}{2}} = \frac{5^2}{1 + \frac{2^2}{2}} = \frac{25}{1+2} = 8,3$$

ANEXO 12

**CÁLCULO DE LAS TOLERANCIAS ADMISIBLES QUE NO FUERON
CONSIDERADAS EN LAS NORMAS**

Cálculo de los errores medios cuadráticos en la medición de ángulos

Para I categoría $\frac{1:25000}{2''} = \frac{1:10000}{x}$; $x=5''$

Para II categoría $\frac{1:10000}{5''} = \frac{1:5000}{x}$; $x=10''$

Para I clase $\frac{1:5000}{10''} = \frac{1:2000}{x}$; $x=25''$

Para II clase $\frac{1:2000}{25''} = \frac{1:1000}{x}$; $x=50''$

Cálculo de los errores de cierre angular

Para I categoría $\frac{2''}{5''\sqrt{n}} = \frac{5''}{x}$; $x=12,5\approx 10''\sqrt{n}$

Para II categoría $\frac{5''}{10''\sqrt{n}} = \frac{10''}{x}$ $x=20''\sqrt{n}$

Para I clase $\frac{10''}{20''\sqrt{n}} = \frac{25''}{x}$; $x=50''\sqrt{n}$

Para II clase $\frac{25''}{50''\sqrt{n}} = \frac{50''}{x}$, $x=100''\sqrt{n}$

Cálculo de la longitud límite de la poligonal

Para II categoría $L = 1,73(0,43)(5000) \approx 3000m$

Para I clase $L = 1,73(0,43)(2000) \approx 1500m$

Para II clase $L = 1,73(0,43)(1000) \approx 700m$

ANEXO 13

**VALIDACIÓN DE LOS PARÁMETROS TÉCNICOS DETERMINADOS PARA
LA POLIGONOMETRÍA**

Tabla 1. Poligonales realizadas considerando los parámetros propuestos en la investigación. Cierres planimétricos

Nombre	Orden de precisión	Error β	Error angular permisible	Error lineal relativo	Error lineal admisible
F. SM-2	IV Orden	0° 0' 16"	0° 4' 22"	1: 41644.91	1: 25000
NF06-YAG308A	IV Orden	0° 1' 59"	0° 4' 7"	1: 51214.30	1: 25000
Puerto de Moa	I Categoría	0° 2' 44"	0° 5' 2"	1:16566	1:10000
Portada PSA	I Categoría	0° 2' 2"	0° 4' 9"	1:14039	1:10000
Abril	II Categoría	0° 2' 1"	0° 6' 19"	1: 8796.32	1: 5000
F06-YaG 371	II Categoría	0° 0' 57"	0° 2' 27"	1: 7377.35	1: 5000
CS-III	I Clase	0° 1' 10"	0° 4' 7"	1: 4336	1: 2000
Punta Gorda	I Clase	0° 1' 16"	0° 5' 1"	1: 4241	1:2000
Che Guevara	II Clase	0° 2' 9"	0° 4' 22"	1: 5421	1:1000
Che Guevara	II Clase	0° 1' 1"	0° 3' 9"	1: 5266	1:1000

Tabla 2. Poligonales realizadas considerando los parámetros propuestos en la investigación. Cierre altimétrico

Nombre	Orden de precisión	Distancia total de la poligonal (m)	Error total en cotas (m)	Error permisible en cotas (m)
F. SM-2	IV Orden	881,04	0,016	0,045
NF06-YAG308A	IV Orden	1276,55	0,027	0,045
Puerto de Moa	I Categoría	1112,19	0,052	0,112
Portada PSA	I Categoría	2118,55	0,073	0,112
Abril	II Categoría	592,37	0,038	0,105
F06-YaG 371	II Categoría	702,63	0,041	0,105
CS-III	I Clase	909,24	0,047	0,252
Punta Gorda	I Clase	5789,10	0,120	0,252
Che Guevara	II Clase	9441,33	0,153	0,501
Che Guevara	II Clase	6213,16	0,124	0,501

ANEXO 14

ÁREA QUE OCUPA EL MODELO DE ONDULACIONES DEL GEOIDE

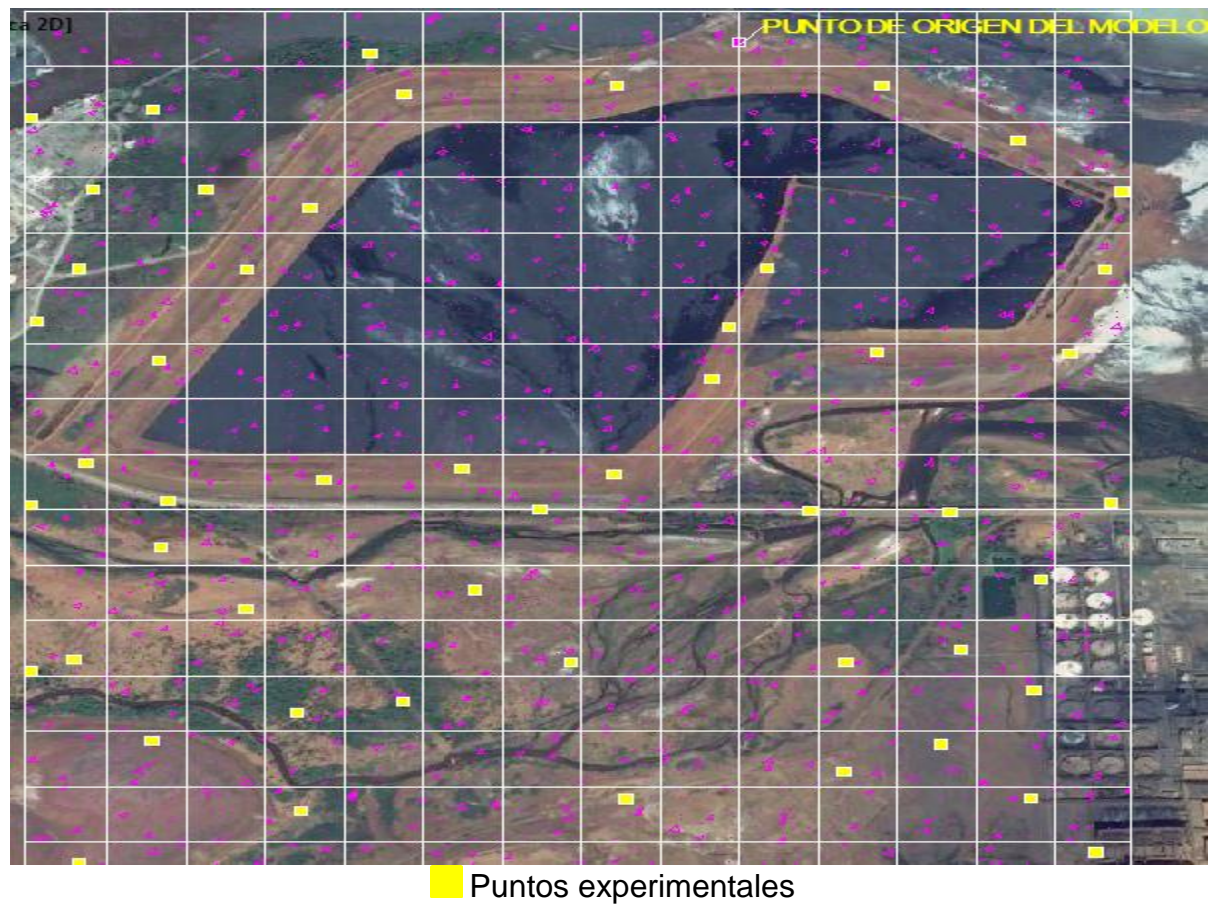


Figura 1. Área que ocupa el modelo de ondulaciones del geoide

ANEXO 15

MODELOS DIGITALES GENERADOS



Figura 1. Ejemplo de uno de los dos modelos digitales del terreno generados.

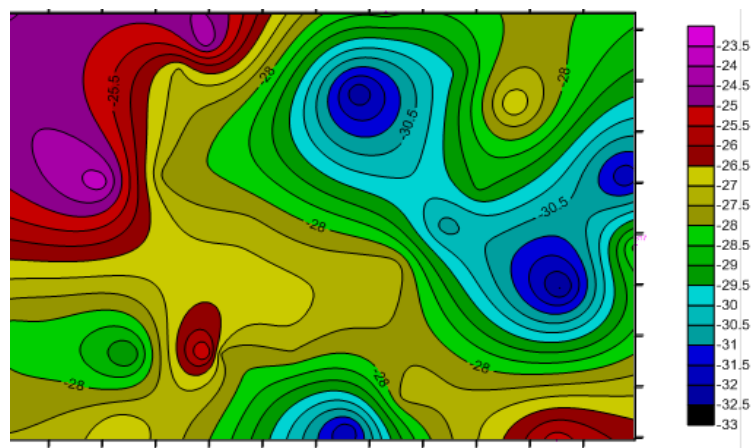


Figura 2. Modelo digital de alturas elipsoidales (MDAE)

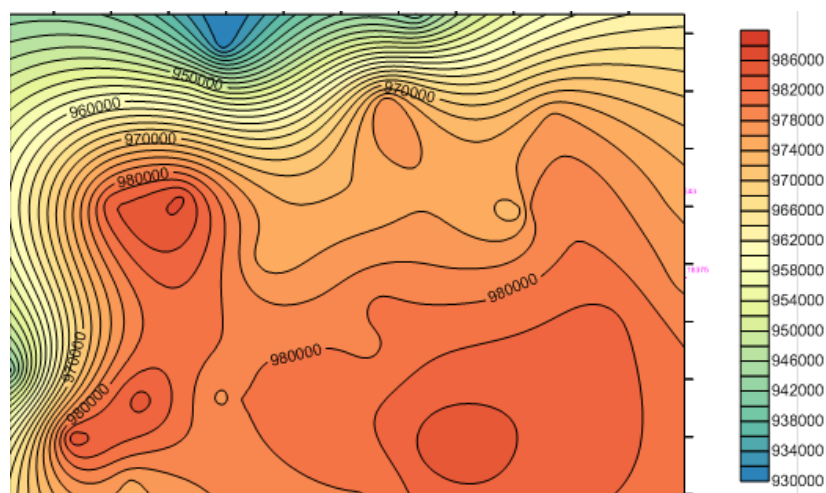


Figura 3. Modelo digital gravimétrico (MDG).

ANEXO 16

**CONTROL DE CALIDAD REALIZADO AL MODELO DE ONDULACIONES
DEL GEOIDE**

Tabla 1. Control de calidad del 10% de las mediciones

Alturas		
H_{mc} (m)	H_p (m)	d_H (m)
2,425	2,428	-0,003
1,866	1,865	0,001
2,180	2,106	0,074
2,210	2,078	0,032
1,903	1,902	0,001
2,320	2,325	-0,005
2,637	2,624	0,013
2,388	2,394	-0,006
2,611	2,614	-0,003
1,816	1,751	0,065
2,417	2,374	0,043
1,974	1,972	0,002
1,629	1,603	0,026
1,696	1,619	0,077
2,515	2,540	-0,025
2,124	2,129	-0,005
2,524	2,553	-0,02
1,728	1,702	0,026
2,438	2,463	-0,025
2,042	2,014	0,028
1,860	1,814	0,046
1,814	1,812	0,002
1,853	1,813	0,040
1,904	1,901	0,003
1,883	1,889	-0,006
1,794	1,814	-0,020
1,861	1,654	0,017
2,165	2,153	0,012
2,914	2,909	0,005
2,083	2,094	-0,011
2,518	2,587	-0,069
2,550	2,589	-0,039

Las desviaciones obtenidas en la determinación de las alturas no exceden los 10 cm.

Los resultados del servicio son declarados:

Conforme: (X) No conforme: ()

ANEXO 17

FICHAS DE COSTOS